



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**ANALÝZA APLIKACE VYSOKORYCHLOSTNÍ  
TECHNOLOGIE VDSL2**

PROCEDURE FOR THE APPLICATION OF A HIGH-SPEED VDSL2 TECHNOLOGY

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Tomáš Coufal**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Bohumil Novotný**

**BRNO 2017**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Teleinformatika**

Ústav telekomunikací

**Student:** Tomáš Coufal

**ID:** 164250

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2016/17

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Analýza aplikace vysokorychlostní technologie VDSL2**

### **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

V rámci bakalářské práce se seznámte s technologií Vectoring, která je využívána pro vysokorychlostní přenosy v již vybudované metalické infrastruktuře. Dále analyzujte a porovnejte VDSL2 s předchozími řešeními přenosu po metalických vedeních a vyzdvihněte jejich klíčové přednosti a negativa. Součástí práce bude také analýza vlivu vectoringu na dosažitelnou efektivní vzdálenost pro upstream a downstream. Práce bude dále rozšířena o nově aplikovaný standard VDSL 3, který bude analyzován a porovnán s technologií VDSL 2.

### **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] Recommendation ITU-T G.993.2 [online]. 2015 [cit. 2016-09-13]. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.993.2-201501-I/en>

[2] BINGHAM, John A. C. ADSL, VDSL, and multicarrier modulation. New York: Wiley, 2000. ISBN 04-712-90-9-8.

**Termín zadání:** 1.2.2017

**Termín odevzdání:** 8.6.2017

**Vedoucí práce:** Ing. Bohumil Novotný

**Konzultant:**

**doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**  
*předseda oborové rady*

### **UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce shrnuje základní parametry vedení, zabývá se technologií VDSL2 a G.fast. Popisuje jejich vlastnosti, profily, masky a také využití vectoringu. Je zde uvedeno srovnání s dalšími využívanými technologiemi. Poslední část je zaměřena na simulace srovnávající různé typy DSL přípojek a na vliv vectoringu na dosažitelnou efektivní vzdálenost.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

VDSL2, VDSL3, G.fast, Vectoring, VDMT, simulace, metalické vedení

## **ABSTRACT**

A bachelor thesis sums up the basic line parameter, it deals with VDSL2 technology and G.fast. The work describes its attributes, profiles, masks and also an utilisation of vectoring. There is a comparison with other used technologies in this work. The last part is focused on simulations which are comparing different types of DSL connections and on an influence of vectoring to achievable effective distance.

## **KEYWORDS**

VDSL2, VDSL3, G.fast, Vectoring, VDMT, simulations, metallic line

COUFAL, T. Analýza aplikace vysokorychlostní technologie VDSL2. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Bohumil Novotný.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Analýza aplikace vysokorychlostní technologie VDSL2 jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího ročníkové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Bohumilu Novotnému za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>11</b>
<b>1 Technologie DSL</b>	<b>12</b>
1.1 Úvod.....	12
1.2 Základní parametry mající vliv na přenos .....	13
1.2.1 Útlum vedení.....	13
1.2.2 Přeslechy .....	14
1.2.3 Vnější zdroje rušení .....	16
<b>2 VDSL2</b>	<b>16</b>
2.1 Definice.....	16
2.2 Srovnání s předchozími technologiemi.....	19
2.3 Vectoring .....	19
2.3.1 Modulace DMT.....	20
2.3.2 Modulace VDMT.....	20
<b>3 VDSL3</b>	<b>22</b>
3.1 G.fast.....	22
3.1.1 Profily .....	23
3.1.2 Masky PSD .....	24
3.1.3 Duplexní metoda.....	25
3.1.4 Struktura TDD rámce.....	26
3.1.5 Struktura superrámce .....	27
3.1.6 Modulace .....	28
3.1.7 Využití fantomových okruhů .....	28
3.1.8 Napájení uzlů .....	29
3.2 Řešení přístupových sítí.....	29

3.2.1	FTTH .....	29
3.2.2	FTTdp .....	30
<b>4</b>	<b>Simulace</b>	<b>32</b>
4.1	Srovnání technologií .....	32
4.2	VDSL2 .....	34
4.3	Vektorová modulace VDMT .....	37
4.4	G.fast .....	40
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>43</b>
	<b>Bibliografie</b>	<b>44</b>
	<b>Seznam zkratek</b>	<b>47</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Průběh útlumu vedení v závislosti na kmitočtu [18] .....	14
Obr. 1.2: Přeslechy NEXT a FEXT mezi páry stejného kabelu [1].....	14
Obr. 2.1: Referenční model protokolů na uživatelské úrovni [5] .....	18
Obr. 2.2: Vliv koordinace pro sestupnou rychlost na přípojce B8-13 [19] .....	21
Obr. 2.3: Vliv koordinace pro vzestupnou rychlost na přípojce B8-13 [19] .....	21
Obr. 3.1: Struktura TDD rámce [12].....	26
Obr. 3.2: Struktura superrámce [12] .....	27
Obr. 3.3: Princip fantomového okruhu [16] .....	29
Obr. 3.4: FTTH [17] .....	30
Obr. 3.5: FTTB [17].....	31
Obr. 3.6: FTTS [17] .....	31



# SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1: Profily VDSL2 [5] .....	17
Tab. 3.1: Profily G.fast [12] .....	23
Tab. 3.2: Parametry masek PSD pro 106 MHz a 212 MHz profil [13] .....	24
Tab. 3.3: Podporované hodnoty $M_{ds}$ v závislosti na hodnotě $M_F$ [12] .....	27
Tab. 3.4: Povinné nastavení hodnoty $M_{SF}$ v závislosti na $M_F$ [12] .....	28

# ÚVOD

Cílem bakalářské práce je analýza technologie VDSL2, popis profilů pro různé zeměpisné podmínky, porovnání s předchozími řešeními (ADSL, ADSL2+, VDSL) a výčet klíčových předností a negativ. Součástí bakalářské práce je i analýza technologie Vectoring, rozbor vlastností a vlivu na efektivní vzdálenost přenosu při použití s VDSL2. Dále bude práce rozšířena o nově aplikovaný standard VDSL3, který bude analyzován a srovnán s technologií VDSL2. Výstupem práce budou simulace přenosových rychlostí v obou směrech pro různé technologie a jejich efektivně využitelnou vzdálenost. Stejně tak simulace vlivu vectoringu na efektivní vzdálenost pro vzestupný i sestupný směr přenosu. Data získaná simulací budou zanesena do přehledných srovnávacích grafů a bude uvedena jejich interpretace.

# 1 TECHNOLOGIE DSL

## 1.1 Úvod

Z hlediska fyzické infrastruktury můžeme komunikační datové sítě rozdělit na dvě části. Na páteřní sítě a jednotlivé rozvody vedoucí ke koncovým uživatelům. Páteřní sítě jsou dnes výhradně propojeny optickými kabely. Pro připojení koncových uživatelů se ale optické kabely nepoužívají příliš často, náklady na instalaci by byly příliš vysoké a kapacita takových spojů by nebyla dostatečně využita. Využití již vybudované telefonní sítě se tedy přímo nabízí. Technologie DSL (Digital Subscriber Line) tedy využívají existující metalické sítě původně určené a využívané pro telefonické služby – POST (Plain old telephone service). Počínaje technologií ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) lze zachovat funkci POST nebo ISDN (Integrated Services Digital Network) přípojky a lze tak zároveň využívat i vysokorychlostní připojení. [1]

Standard ADSL první generace byl definován v roce 1999 (ITU-T G. 992.1). Nabízí asymetrický přenos s rychlostí až 8 Mbit/s pro sestupný směr a až 1 Mbit/s pro vzestupný směr. ADSL využívá šířku pásma 1,104 MHz rozdělenou do 256 subkanálů [2]. V Evropě přípojka používá vícetónovou modulaci DMT (Discrete MultiTone). Dále je možné použít QAM (Quadrature amplitude modulation), případně CAP (Carrierless amplitude phase modulation). [3]

Nejnovější standard pro asymetrický přenos nese označení ADSL2+ a byl definován v doporučení ITU G. 992.5 v roce 2009. Oproti předchozí generaci ADSL rozšiřuje dvojnásobně šířku využitelného pásma na 2,208 MHz, která se dále dělí na 512 subkanálů. Došlo i k navýšení rychlostí udávaných v hodnotách maximálně 24 Mbit/s ve směru sestupném a 1,4 Mbit ve směru vzestupném [4]. Díky relativně velkému dosahu a vysokým přenosovým rychlostem je tato technologie v současnosti nejpoužívanější.

Další technologií využívanou na metalickém vedení je technologie VDSL (Very High Speed DSL), definovaná standardem ITU G.993.1 s šířkou pásma 12 MHz, případně její novější varianta VDSL2. Novinkou je možnost využití kromě asymetrických i symetrické přenosy. Novější technologie VDSL2 byla definována standardem ITU G. 993.2 v roce 2011. Opět došlo ke zvětšení šířky pásma, a to až na 30 MHz. Stejně, jako v případě ADSL, je využita modulace DMT. Obousměrná rychlost dosahuje hodnot 200 Mbit/s, avšak díky použití vysokých kmitočtů pouze na krátké vzdálenosti. [5]

## 1.2 Základní parametry mající vliv na přenos

Jak již bylo řečeno, všichni zástupci technologie DSL používají již vybudovanou síť původně určenou pro telefonní služby POST. Není tedy nutné investovat další prostředky do pokládání nových rozvodů ke koncovým zařízením, což je hlavní výhoda tohoto řešení. Původní vedení ale bylo konstruováno pro standartní telefonní hovory se šířkou pásma 4 kHz a přenosovou rychlostí 64 kbit/s. To je v porovnání s technologií VDSL2, která dosahuje při šířce pásma do 30 MHz rychlostí až 200 Mbit/s, značný rozdíl. Na vedení, které původně pro telefonní hovory plně postačovalo, se při provozu VDSL2, případně předchozích technologií DSL, objevují parazitní vlastnosti, které zkracují využitelnou délku vedení od ústředny k účastníkovi. Základními vlastnostmi, se kterými je třeba počítat, je útlum vedení a rušení přeslechy.

### 1.2.1 Útlum vedení

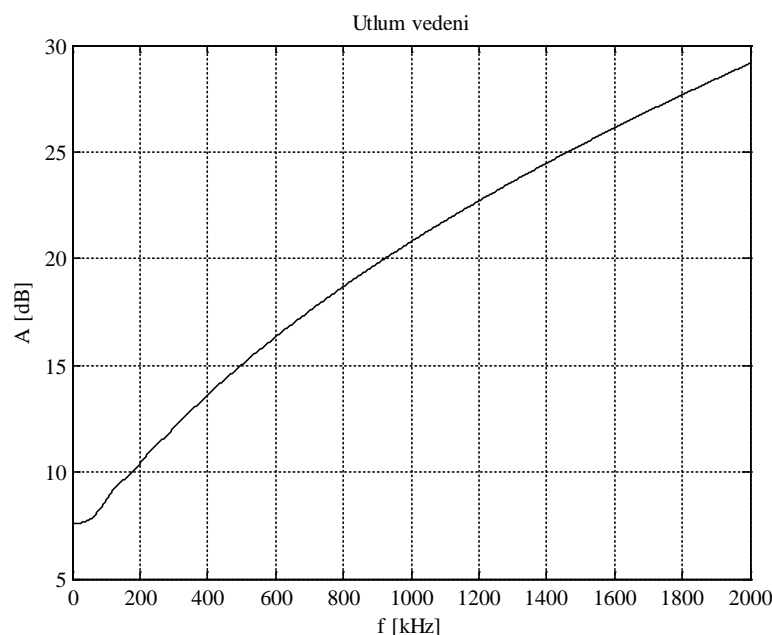
Nejdůležitějším parametrem, který ovlivňuje přenos, je útlum vedení, který má zásadní vliv na vzdálenost, na které je možné DSL využívat. U symetrických párů je také značná závislost útlumu na kmitočtu. To při původním využití vedení (tedy použití pro telefonní hovory, které využívají šířku pásma 4 kHz) problém nebyl. Technologie VDSL2 ale využívá pásmo až 30 MHz, díky čemuž sice dosahuje velmi vysokých přenosových rychlostí, ale jen na velmi krátké vzdálenosti (pro nejvyšší rychlosti pouze 300 m od ústředny). Pro výpočet útlumu vedení  $A$  se dá použít některý z následujících vztahů:

$$A = \alpha \cdot l \quad [\text{dB}], \quad (1.1)$$

kde  $\alpha$  je měrný útlum vedení a  $l$  délka vedení.

$$A = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_2} = L_{m1} - L_{m2} \quad [\text{dB}], \quad (1.2)$$

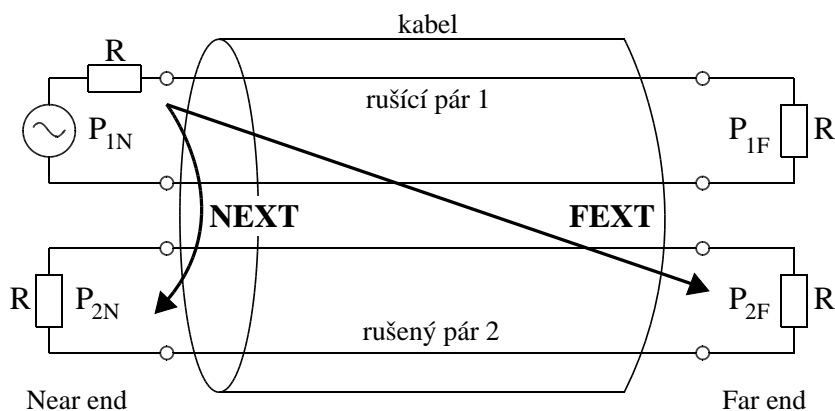
kde  $P_1$  je výkon na vstupu a  $P_2$  výkon na výstupu vedení.  $L_{m1}$  je absolutní úroveň na vstupu a  $L_{m2}$  absolutní úroveň výkonu na výstupu. Obě hodnoty vztažené k referenční hodnotě 1 mW [1]. Na obrázku Obr. 1.1 je vykreslena kmitočtová závislost útlumu vedení.



Obr. 1.1: Průběh útlumu vedení v závislosti na kmitočtu [18]

## 1.2.2 Přeslechy

Přeslechy jsou největším zdrojem rušení. Existují dva hlavní druhy přeslechů, které rozlišujeme podle toho, kde se na kabelu přeslechy projevují. Přeslech NEXT (přeslech na blízkém konci) a FEXT (přeslech na vzdáleném konci). Přeslech NEXT vzniká na začátku vedení přenosem signálů z vysílače na ostatní páry ve více párovém kabelu, dochází tedy k rušení přijímače na stejné straně vedení, kde se nachází vysílač. Přeslech NEXT tedy není závislý na délce vedení. Přeslech FEXT vzniká stejně tak na začátku vedení, ale projevuje se na přijímači na opačné straně vedení. Dochází tedy k rušení přijímače na opačné straně signály z vysílače na jiných párech. [6]



Obr. 1.2: Přeslechy NEXT a FEXT mezi páry stejného kabelu [1]

Útlum přeslechu NEXT můžeme podle Obr. 1.2 vyjádřit jako:

$$A_{NEXT} = 10 \cdot \log \frac{P_{1N}}{P_{2N}} \text{ [dB]}, \quad (1.3)$$

kde  $P_{1N}$  je vstupní výkon na rušícím páru a  $P_{2N}$  výstupní výkon na rušeném páru na blízkém konci. Stejně jako útlum vedení je i útlum přeslechu závislý na kmitočtu. Přeslechy také závisejí na vzájemné poloze párů. Mezi bližšími páry jsou větší přeslechové vazby a menší útlum přeslechu. Útlum přeslechu FEXT vyjádříme jako:

$$A_{FEXT} = 10 \cdot \log \frac{P_{1N}}{P_{2F}} \text{ [dB]}, \quad (1.4)$$

kde  $P_{1N}$  je vstupní výkon na rušícím páru a  $P_{2F}$  výstupní výkon na rušeném páru na vzdáleném konci. Útlum přeslechu na vzdáleném konci je závislý nejen na kmitočtu ale i na délce vedení. [1]

Pro měření přeslechu NEXT je nutné generátor i přijímač umístit na stejnou stranu měřeného kabelu. Naopak při měření přeslechu FEXT jsou generátor a přijímač připojeny na opačných stranách kabelu. Proto je toto měření v reálných podmínkách náročné na provedení. [1]

Pro vliv přeslechu na přenos signálu je podstatný odstup přeslechu od signálu. Odstup  $A_S$  je dán útlumem přeslechu, zmenšeným o útlum podle rovnice 1.1. Pro přeslech na blízkém konci NEXT tedy:

$$A_{S/NEXT} = A_{NEXT} - A = A_{NEXT} - \alpha \cdot l \text{ [dB]}. \quad (1.5)$$

Stejně tak pro přeslech FEXT:

$$A_{S/FEXT} = A_{NFEXT} - A = A_{FEXT} - \alpha \cdot l \text{ [dB]}. \quad (1.6)$$

Při porovnání závislostí odstupů FEXT a NEXT, zjistíme závažnější vliv přesle-

chu NEXT ve dvou směrech. Strmý pokles odstupu signálu od přeslechu NEXT s rostoucím kmitočtem, a také strmější pokles s rostoucí délkou vedení. Právě proto je nutné eliminovat přeslechy na blízkém konci pomocí frekvenčního, případně časového dělení. [6]

### 1.2.3 Vnější zdroje rušení

Vnějšími vlivům rušení jsou vystaveny všechny páry v kabelu. Rozlišujeme dva druhy vnějšího rušení – vysokofrekvenční a impulsní.

Vysokofrekvenční rušení má vliv prakticky na všechny páry v kabelu s různou intenzitou v celém frekvenčním pásmu. Způsobují ho rádiové vysílače dlouhých a středních vln. Velký vliv má pak na venkovní kabely.

Impulsní rušení je nejčastěji způsobováno spínáním a regulováním výkonu do zátěže elektrickou sítí. Při digitálním přenosu může mít za následek vznik chyb.

## 2 VDSL2

Technologie VDSL2 dle doporučení ITU-T G. 993.2 využívá již vybudovanou síť metalických vedení, dříve používanou pro telefonní služby (POST). VDSL2 vychází z první generace VDSL (ITU-T G. 993.1), potažmo z ADSL, se kterou sdílí myšlenku koexistence s přípojkami POST či ISDN na jediném vedení. Tyto technologie jsou vzájemně odděleny pomocí rozbočovačů. Kromě asymetrického režimu je zde možnost využít i symetrického přenosu dat.

### 2.1 Definice

V doporučení ITU-T G. 993.2 jsou pro VDSL2 dány tři základní typy přípojek určených do různých prostředí. Annex A je určen pro Severní Ameriku, Annex B pro Evropu a Annex C pro Japonsko. Každá specifikace se dále dělí podle regionů.

Druhá generace VDSL dovoluje jen jedinou modulaci DTM s roztečí subkanálů 4,3125 kHz která je shodná s ADSL. Využít lze kmitočty až 30 MHz. Maximální počet subkanálů je 4096, proto je v případě použití šířky pásma 30 MHz nutné zdvojnásobit rozteč subkanálů na 8,625 kHz. [7]

Díky rozšíření kmitočtového pásma se výrazně zkracují vzdálenosti, na kterých lze VDSL2 provozovat, protože s rostoucím kmitočtem roste i útlum vedení, což je vidět

na Obr. 1.1. S ohledem na různé podmínky přenosu se pro VDSL2 stanovily různé profily, u nichž je různá šířka využitého kmitočtového pásma, a tedy i šířka subkanálů, a různý maximální vysílací výkon. Pro obousměrný provoz je nutné rozdělit kmitočtové pásmo alespoň na dvě subpásma pro dva směry přenosu. U VDSL2 se k tomu využívá metoda frekvenčního dělení FDD (Frequency Division Duplex). Díky tomu dochází k potlačení přeslechu NEXT. Protože přípojka VDSL2 musí nabízet jak asymetrické, tak i symetrické přenosy, je nutné pásma pro vzestupný a sestupný směr pravidelně střídát tak, aby bylo dosaženo požadovaných rychlostí přenosu. Způsob střídání pásem upravuje kmitočtový plán. Subpásma ve směru ke koncovému zařízení se označují jako DS1, DS2, DS3, DS4. Ve směru od koncového zařízení potom US0, US1, US2, US3, US4. [8]

Pro evropský Annex B jsou stanoveny dva základní kmitočtové plány. Oba vycházejí z plánů pro původní technologii VDSL. Plán 997 je vhodný pro symetrický přenos. Plán 998 potom pro asymetrické varianty přípojek.

Tab. 2.1: Profily VDSL2 [5]

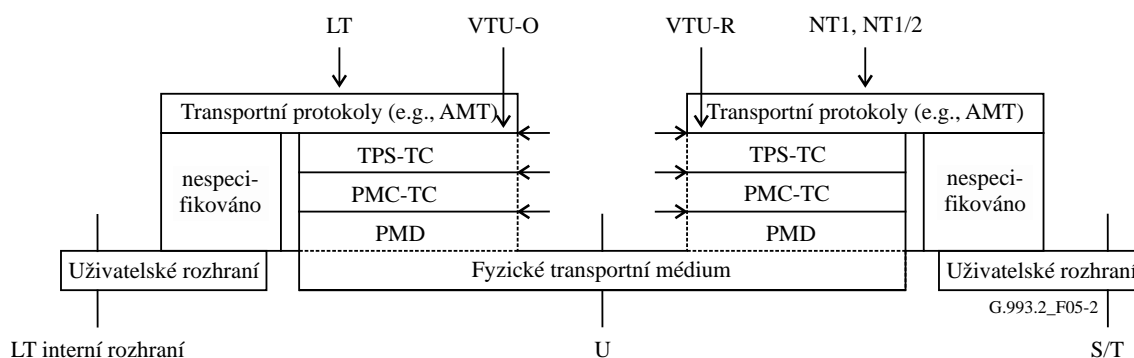
Frekvenční plán	Parametr	Profily							
		8a	8b	8c	8d	12a	12b	17a	30a
All	Maximální výkon v sestupném směru [dBm]	+17,5	+20,5	+11,5	+14,5	+14,5	+14,5	+14,5	+14,5
	Maximální výkon ve vzestupném směru [dBm]	+14,5	+14,5	+14,5	+14,5	+14,5	+14,5	+14,5	+14,5
	Rozteč subkanálů [kHz]	4,3125	4,3125	4,3125	4,3125	4,3125	4,3125	4,3125	8,625
	Maximální teoretická rychlost přenosu [Mbit/s]	50	50	50	50	68	68	100	200
Annex A (998)	Počet subkanálů v sestupném směru (šířka pásma [MHz])	1971 (8,5)	1971 (8,5)	1971 (8,5)	1971 (8,5)	1971 (8,5)	1971 (8,5)	4095 (17,660)	2666 (23)
	Počet subkanálů ve vzestupném směru (šířka pásma [MHz])	1205 (5,2)	1205 (5,2)	1205 (5,2)	1205 (5,2)	2782 (12)	2782 (12)	2782 (12)	3478 (30)
Annex B (998E)	Počet subkanálů v sestupném směru (šířka pásma [MHz])	1971 (8,5)	1971 (8,5)	1971 (8,5)	1971 (8,5)	1971 (8,5)	1971 (8,5)	4095 (17,660)	3478 (30)
	Počet subkanálů ve vzestupném směru (šířka pásma [MHz])	1205 (5,2)	1205 (5,2)	1205 (5,2)	1205 (5,2)	2782 (12)	2782 (12)	3246 (14)	2885 (24,890)
Annex B (997E)	Počet subkanálů v sestupném směru (šířka pásma [MHz])	1634 (7,05)	1634 (7,05)	1634 (7,05)	1634 (7,05)	1634 (7,05)	1634 (7,05)	3246 (14)	3130 (27)
	Počet subkanálů ve vzestupném směru (šířka pásma [MHz])	2047 (8,832)	2047 (8,832)	1182 (5,1)	2047 (8,832)	2782 (12)	2782 (12)	4095 (17,660)	3478 (30)



Frek- venční plán	Parametr	Profily							
		8a	8b	8c	8d	12a	12b	17a	30a
Annex C	Počet subkanálů v sestupném směru (šířka pásma [MHz])	1971 (8,5)	1971 (8,5)	1971 (8,5)	1971 (8,5)	1971 (8,5)	1971 (8,5)	4095 (17,660)	2098 (18,1)
	Počet subkanálů ve vzestupném směru (šířka pásma [MHz])	1205 (5,2)	1205 (5,2)	1205 (5,2)	1205 (5,2)	2782 (12)	2782 (12)	2782 (12)	3478 (30)

Ke kompletní definici vysílání je nutné určit maximální úroveň výkonu signálu. K tomu slouží masky spektrální výkonové hustoty PSD. Z masky se určuje nejvyšší hodnota vysílaného signálu na konkrétní frekvenci. Kromě úrovně vysílaného signálu se masky odlišují i využitím případně nevyužitím pásma US0. [8]

Vlastnosti a funkce zařízení přípojky VDSL2 lze popsat prostřednictvím vrstevného modelu jak na straně uživatele (VTU-C), tak na straně ústředny (VTU-R). Referenční model protokolů je zobrazen na obrázku Obr. 2.1.



Obr. 2.1: Referenční model protokolů na uživatelské úrovni [5]

Funkční blok PMD je spojen s přenosem signálu a s přenosovým prostředím. Stará se o potlačení ozvěn, modulaci a demodulaci, generování taktu a kompenzaci negativních parametrů vedení. Bloky PMD, PMS-TC jsou nezávislé na typech datového přenosu, protože jsou na všech zařízeních stejné. Souvisí s přizpůsobením dat fyzickému médiumu. Blok PMS-TC se stará o vytváření rámců a rámcovou synchronizaci. V tomto bloku je také přidáváno záhlaví datových rámců. Blok TPS-TC respektuje strukturu dat a typ přenosu, slouží k multiplexování, demultiplexování a prioritizaci toků určitých služeb. [8]

## 2.2 Srovnání s předchozími technologiemi

S postupným nasazováním technologií od ADSL či VDSL k jejich druhým generacím ADSL2+ a VDSL2 významně rostla přenosová rychlost. Díky vlastnostem vedení popsaných v předchozích kapitolách jsou vyšší rychlosti dosažitelné pouze na krátké vzdálenosti. Právě proto jsou technologie ADSL2/ADSL2+ stále využívány a budou využívány i nadále. Hlavní výhodou VDSL2 je tedy vysoká přenosová rychlost na vzdálenosti do 500 m. Pro další rozvoj je nutné budovat předsunuté ústředny, přímo napojené na optickou síť. Touto cestou lze vysokorychlostní připojení nabídnout velkému okruhu uživatelů. Hlavní nevýhodou je tedy krátká využitelná vzdálenost vedení.

Původní technologie ADSL byla navržena pro asymetrický přenos se šířkou pásma 1,104 MHz. Využívá vícetónové modulace DMT, která pásmo dělí do 256 subkanálů. Pro obousměrný přenos je využita metoda frekvenčního dělení FDD, případně metoda potlačení ozvěn EC. Ta umožňuje překryv pásem obou přenosových směrů. [1]

ADSL2 přímo vychází z ADSL. Zvýšení rychlostí se zde dosáhlo zejména zavedením flexibilní struktury rámce, díky které se snížily nároky na režii. Rychlost přenosu je nově možné uzpůsobovat během přenosu. Ke dvojnásobnému rozšíření šířky pásma na 2,208 MHz došlo u varianty ADSL2+.

Druhým typem využívané technologie je VDSL, která dokáže poskytnout vyšší rychlosti než předešlé technologie, s možností symetrického přenosu s šířkou pásma až 12 MHz. Stejně jako přípojky ADSL využívá modulaci DMT, případně modulaci na jednu nosnou, tyto dvě modulace jsou ale navzájem nekompatibilní. Pro obousměrný přenos je využito výhradně frekvenčního dělení FDD.

Z VDSL vychází druhá generace VDSL2. Zde je možná jen jediná modulace DMT. VDSL2 poskytuje jak asymetrické, tak i symetrické přenosy. Využitá šířka pásma je až 30 MHz, ovšem využitelná pouze na krátké vzdálenosti.

Všechny tyto technologie dovolují využití jak DSL, tak i funkci POST či ISDN přípojky. VDSL je při použití modulace DMT díky stejné šířce subkanálu kompatibilní s ADSL. Dalšímu srovnání se věnuje kapitola 4.1, ve které jsou uvedeny simulace přenosových rychlostí a využitelných vzdáleností těchto technologií.

## 2.3 Vectoring

Hlavní složkou šumu ve vedení jsou přeslechy od ostatních vedení v kabelu, to značně snižuje přenosové rychlosti. Pro potlačení přeslechu na blízkém konci (NEXT)

využíváme frekvenčního dělení FDD. Pro potlačení přeslechu na vzdáleném konci je ale nutné využívat jiných metod. Díky vektorizaci je možné odečíst přeslechy z ostatních systémů provozovaných ve svazku a dosáhnout tak rychlostí srovnatelných s provozováním jediné přípojky v kabelu. Toho však nebude možné dosáhnout dokonale, v praxi se vždy vyskytnou nekoordinované systémy, od kterých bude rušení vznikat.

### 2.3.1 Modulace DMT

Modulace DMT (Discrete MultiTone) je modulace s více nosnými, kterou využívá jak starší ADSL, tak VDSL a všechny jejich varianty. Modulace DMT rozšiřuje frekvenční pásmo na několik subkanálů s konstantní šířkou. Počet subkanálů je závislý na parametrech dané technologie, stejně tak jejich šířka. V každém subkanálu se pomocí kvadrurně amplitudové modulace (QAM) provádí modulace dat. Skupina symbolů QAM se pomocí inverzní Fourierovy transformace na všech kanálech převede do časové oblasti na tzv. DMT symbol. Pro každý subkanál je možné generovat různý počet stavů QAM podle aktuálního poměru signálu a šumu. [3]

### 2.3.2 Modulace VDMT

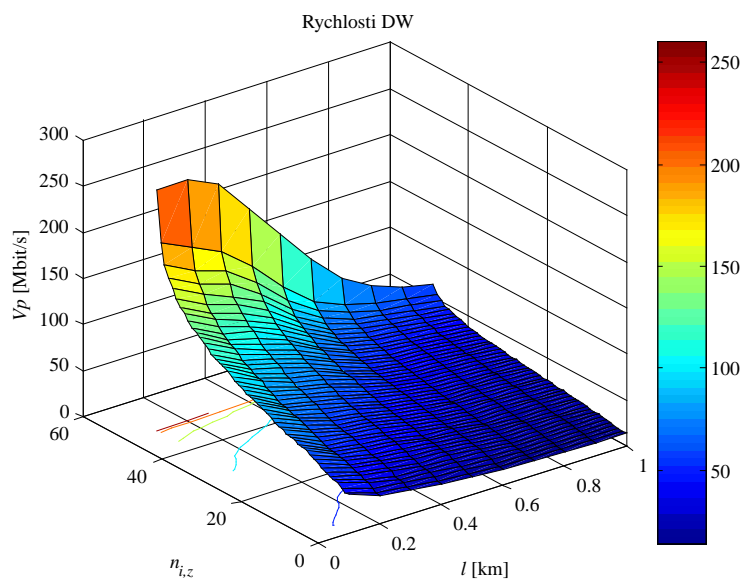
Modulace VDMT se využívá pro potlačení přeslechu na vzdáleném konci (FEXT). Jedná se o rozšíření klasické modulace DMT, která je využitelná pro všechny typy přípojek xDSL. Pro správné fungování je nutné znát parametry vedení i parametry přeslechů generovaných ostatními systémy umístěnými ve stejném svazku. Přístup ke všem těmto signálům vysílaných ostatními přípojkami má pouze DSLAM, kompenzaci je tedy nutné pro oba směry provádět na straně ústředny. Pro vzestupný směr dochází ke kompenzaci při příjmu. Pro sestupný směr je nutná předkompenzace na straně vysílače. [9]

V sestupném směru je DSLAM společný prvek pro všechny přípojky provozované ve svazku. V každém okamžiku je tedy možné zjistit informaci o všech vysílaných DMT symbolech. Stejně tak na straně ústředny jsou známy parametry jednotlivých vedení a přeslechové vazby mezi nimi. Je tedy možné upravit DMT symboly tak, aby měly na modemu koncového účastníka ideální průběh pro bezchybnou detekci a interpretaci [10]. Pro bezchybné fungování je nutná synchronizace vysílání na straně ústředny tak, aby na sebe vedení působila tak, jak bylo vypočítáno.

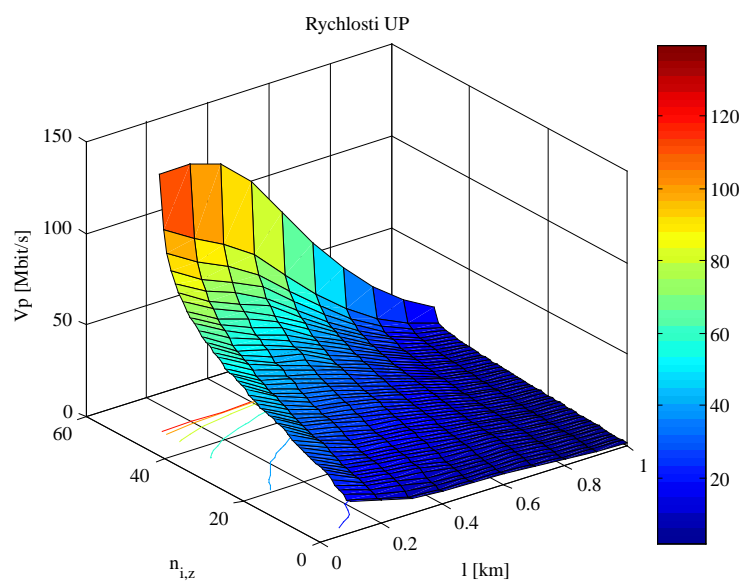
Ve vzestupném směru nemůže docházet k úpravě symbolů DMT na straně modemu. Modem nemá a ani nemůže mít přístup k symbolům, vysílaným ostatními přípojkami v kabelu. Navíc by byly na modemy kladeny příliš vysoké výpočetní nároky. Přijímaný signál je upravován na straně přijímače znovu, tedy až v DSLAMu. Opět je nutné zajistit synchronizaci vysílání, což není vzhledem k různým délkám vedení tak snadné, jako pro

směr sestupný.

V následujících obrázcích Obr. 2.2 a Obr. 2.3 jsou simulovány přínosy koordinace v závislosti na délce vedení. Byl uvažován svazek o 50 symetrických párech s průměrem 0,4 mm (ETSI). Celý svazek je plně obsazen přípojkami stejného typu (B8-13). Délka vedení 100 m až 1 km s krokem simulace 100 m. Postupně je zvyšován počet koordinovaných přípojek, z čehož vznikají následující trojrozměrné grafy pro vzestupný i sestupný směr přenosu [10].



Obr. 2.2: Vliv koordinace pro sestupnou rychlost na přípojce B8-13 [19]



Obr. 2.3: Vliv koordinace pro vzestupnou rychlost na přípojce B8-13 [19]

Kromě výhod, které modulace VDMT přináší, jsou zde i značně vysoké nároky na výpočetní výkon. Pro kabely s několika sty symetrickými páry je koordinace všech linek velmi náročná.

## 3 VDSL3

Technologie VDSL3 jako taková dosud nebyla standardizována a pod tímto názvem je tedy dnes provozováno několik technologií. Společnost CETIN, která dnes v ČR provozuje klasické metalické telefonní vedení, využívá názvu VDSL3 pro technologie VDSL2 s využitím kmitočtového plánu 35b [11], tento plán využívá šířku pásma 35 MHz a jde tak pouze o rozšíření původního doporučení. Plnohodnotným nástupcem je ovšem až technologie G.fast.

### 3.1 G.fast

G.fast je další generací DSL systému, jehož standardizace proběhla v roce 2014 a je popsána v doporučení ITU-T G.9700 a G.9701. Doporučení specifikuje gigabitové širokopásmové připojení využívající existující infrastrukturu metalických párů, původně určených pro telefonní služby (POST). Technologie G.fast je vhodná pro využití na krátké vzdálenosti. Typicky pro rozvod připojení tam, kde se optické vlákno nachází v blízkosti koncového zákazníka. Tato architektura připojení se označuje jako FTTdp (Fiber to the Distribution Point), kde je optické připojení distribučního bodu, nacházejícího se přímo v budově nebo v těsné blízkosti. Doporučení je optimalizováno pro provoz až do vzdálenosti 250 metrů na vedení o průměru 0,5 mm. S určitými výkonovými omezeními je ho však možné provozovat až na vzdálenosti 400 metrů. Zajištěna je i podpora symetrických i asymetrických přenosů v různých poměrech díky časovému dělení pásma. [12]

V první verzi doporučení se počítá s přenosy o rychlostech až 1 Gbit/s s využitím pásma do 106 MHz. V budoucnu potom pásma až 212 MHz, které je v současné době určeno pro další výzkum. [10]

Klíčovými funkcemi této technologie je zajištění rychlostí až 1 Gbit/s pro uživatele, kteří nedosáhnou na optické připojení, důležitá je také možnost instalace připojení samotnými uživateli bez nutnosti technických zásahů operátora a koexistence s ADSL2 a VDSL2 na okolních párech. Nutné je použití multitónové modulace DMT a časového dělení kanálu TDD. Volitelně je možné použití vectoringu pro potlačení přeslechu a zvýšení datových rychlostí.

Podle doporučení je možné na symetrickém páru o průměru 0,5 mm dosahovat těchto datových rychlostí [12]:

- 500 až 1000 Mbit/s na vedení kratším než 100 m;
- 500 Mbit/s na 100 m;
- 200 Mbit/s na 200 m;
- 150 Mbit/s na 250 m;
- 500 Mbit/s na 50 m, při provozu v pásmu od 17 MHz.

### 3.1.1 Profily

Doporučení ITU-T G.9701 v současné době popisuje dva profily. Profil 106a pro šířku pásma 106 MHz a profil 212a s šířkou pásma 212 MHz. Šířka pásma obou profilů začíná na hodnotě 2,2 MHz. Tím je zajištěna kompatibilita se systémy ADSL. Profily jsou specifikovány tak, aby umožňovaly vysílačům podporovat podmnožinu povolených nastavení a stále vyhovovaly podmínkám doporučení. To umožňuje vyvíjet implementace zaměřené na konkrétní požadavky. Vysílače, které vyhovují doporučení, musí podporovat alespoň jeden profil. Parametry profilů jsou uvedeny v tabulce Tab. 3.1.

Tab. 3.1: Profily G.fast [12]

Parametr	Hodnota parametru profilu	
	106a	212a
Maximální výkon v sestupném směru [dBm]	+4,0	Pro další studium
Maximální výkon ve vzestupném směru [dBm]	+4,0	Pro další studium
Typ překódování	pouze lineární	Pro další studium
Rozteč subkanálu [kHz]	51,75	51,75
Maximální teoretická rychlost přenosu [Mbit/s]	1000	Pro další studium
Maximální počet kódových slov FEC v jednom DTU ( $Q_{max}$ )	16	Pro další studium
Index nejnižší podporované subnosné v sestupném směru (spodní frekvence pásma (informativní))	43 (2,22525 MHz)	43 (2,22525 MHz)
Index nejnižší podporované subnosné ve vzestupném směru (spodní frekvence pásma (informativní))	43 (2,22525 MHz)	43 (2,22525 MHz)

Parametr	Hodnota parametru profilu			
	106a		212a	
Index nejvyšší podporované sub-nosné v sestupném směru (spodní frekvence pásma (informativní))	2047 (105,93225 MHz)		Pro další studium	
Index nejvyšší podporované sub-nosné ve vzestupném směru (spodní frekvence pásma (informativní))	2047 (105,93225 MHz)		Pro další studium	
Maximální počet bajtů eoc ve směru na periodě logického rámce	M <sub>F</sub> = 36	M <sub>F</sub> = 23	M <sub>F</sub> = 36	M <sub>F</sub> = 23
	1500	1100	3000	2200

Stejné frekvence jsou použity jak pro vzestupný, tak pro sestupný směr přenosu díky časovému dělení pásma. Úrovně vysílacích výkonů pro oba plány upřesňují masky výkonové hustoty PSD.

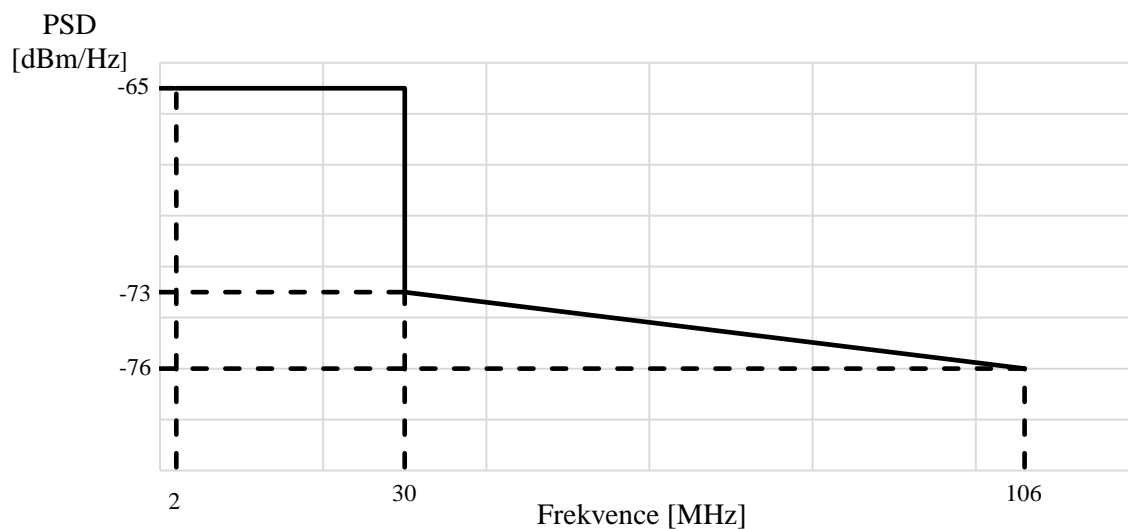
### 3.1.2 Masky PSD

Masky spektrální výkonové hustoty (PSD) určují maximální možný výkon v daném pásmu. Jsou důležité pro omezení vlivu rušení ostatních systémů v určitém pásmu.

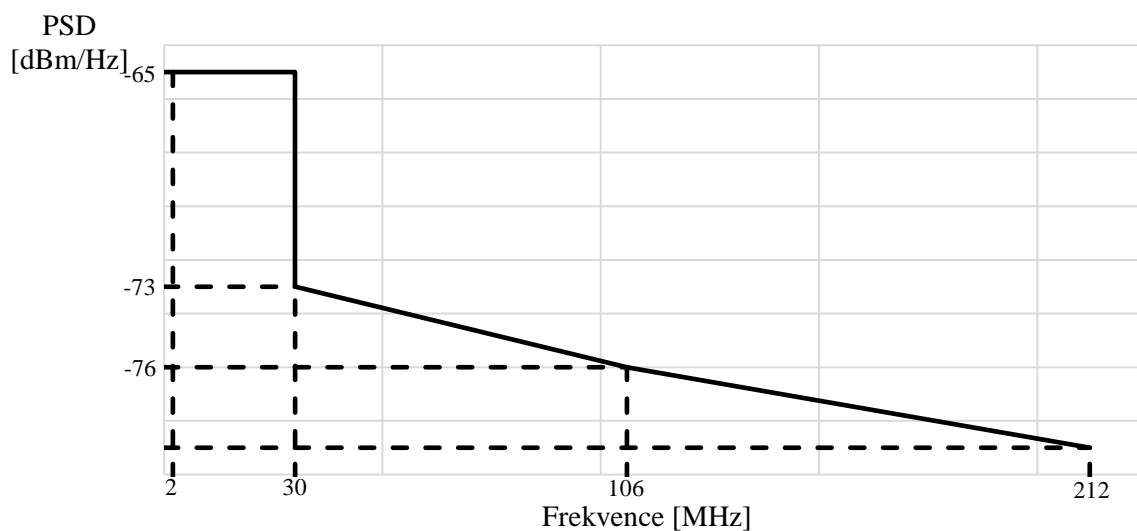
Počítá se s maskami s počátky na různých frekvencích tak, aby byla zajištěna koexistence s předchozími technologiemi přenosu, primárně s ADSL2 a VDSL2. Počátky jsou stanoveny na 2,5 MHz, 18 MHz a 30 MHz [13]. Přímou tak navazují na nejvyšší využitelné kmitočty xDSL systémů. Hodnoty výkonů na různých frekvencích jsou uvedeny v tabulce (Tab. 3.2) a dále pak v grafech (Graf 3.1 a Graf 3.2).

Tab. 3.2: Parametry masek PSD pro 106 MHz a 212 MHz profil [13]

106 MHz		212 MHz	
Frequency (MHz)	PSD (dBm/Hz)	Frequency (MHz)	PSD (dBm/Hz)
2	– 65	2	– 65
30	– 65	30	– 65
30	– 73	30	– 73
106	– 76	106	– 76
		212	– 79



Graf 3.1: Maska PSD pro plán 106 MHz [13]



Graf 3.2: Maska PSD pro plán 212 MHz [13]

### 3.1.3 Duplexní metoda

Technologie G.fast používá časového dělení kanálu TDD (time division duplex). To je rozdíl oproti předchozím technologiím, které využívaly frekvenčního dělení FDD. Odpadá tak nutnost přidělování pásem jednotlivým směrům přenosu a díky tomu je přidělování přenosové kapacity flexibilnější. Je zde tedy možnost jak symetrických, tak i asymetrických přenosů v libovolném poměru rychlostí vzestupný/sestupný směr. [14]

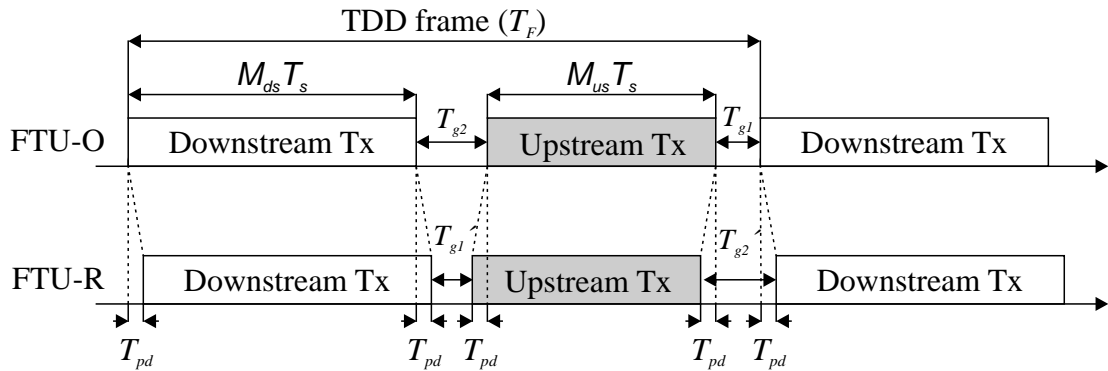
Všechny linky, které jsou připojeny k jednomu distribučnímu bodu a tvoří tak vektorovou skupinu, musí mít synchronizované symboly, rámce i superrámce tak, aby nedocházelo k časovému překryvu mezi přenosy vzestupného a sestupného směru. Pozice



symbolů jsou pro oba směry přenosu vyrovnávány v referenčních bodech na všech linkách vektorové skupiny. Toto uspořádání nese označení synchronizované časové dělení kanálu STDD. [15]

### 3.1.4 Struktura TDD rámce

Doba přidělená přenosům ve vzestupném i sestupném směru je určena formátem TDD rámce. Struktura rámce je zobrazena na obrázku (Obr. 3.1).



Obr. 3.1: Struktura TDD rámce [12]

Poznámky popisující parametry rámce TDD:

- $T_{g1}$  a  $T_{g2}$  – časové hodnoty mezery na rozhraní FTU-O (FTU optické sítě)
- $T_{g1}'$  a  $T_{g2}'$  – časové hodnoty mezery na rozhraní FTU-R (FTU na straně účastníka)

FTU-O i FTU-R vysílají s ohledem na hranice symbolů downstream (sestupný směr) a upstream (vzestupný směr). Ve všech případech by měla být dodržena rovnost

$$T_{g1} + T_{g2} = T_{g1}' + T_{g2}'. \quad (3.1)$$

Skutečná hodnota  $T_{g1}'$  je stanovena během inicializace. Tato hodnota se poté oznamuje účastnické straně FTU-R ve zprávě O-SIGNATURE a je dále upravena tak, aby vyrovnala hranice všech přijatých symbolů. Použitelný rozsah  $T_{g1}'$  je od 6,5  $\mu s$  do 11,2  $\mu s$ . FTU-O musí podporovat  $T_{g1} \geq 6,5 \mu s$ .

Maximální hodnota  $T_{g2}$  by neměla překročit 11,2  $\mu s$ . To je důležité pro krátké smyčky, jejichž hodnota  $T_{pd}$  se blíží nule. Při nastavení hodnoty  $T_{g2} = 11 \mu s$  může být použito zpoždění v rozmezí 0 až  $T_{pd} \leq (11-6,5) / 2 = 2,25 \mu s$ . Za předpokladu typického zpoždění 0,5  $\mu s$  na 100 metrech umožňuje tento rozsah vytvoření vektorové skupiny o délkách smyček od 0 do 450 metrů.

Hodnota  $T_F$  definuje délku rámce. Jeden TDD rámec se skládá ze symbolů pro sestupný směr ( $M_{ds}$ ), vzestupný směr ( $M_{us}$ ) a celkové délky mezery ( $T_{g1} + T_{g2}$ ). Tedy

$$T_F = M_F \cdot T_S, \quad (3.2)$$

kde

$$M_F = M_{ds} + M_{us} + 1. \quad (3.3)$$

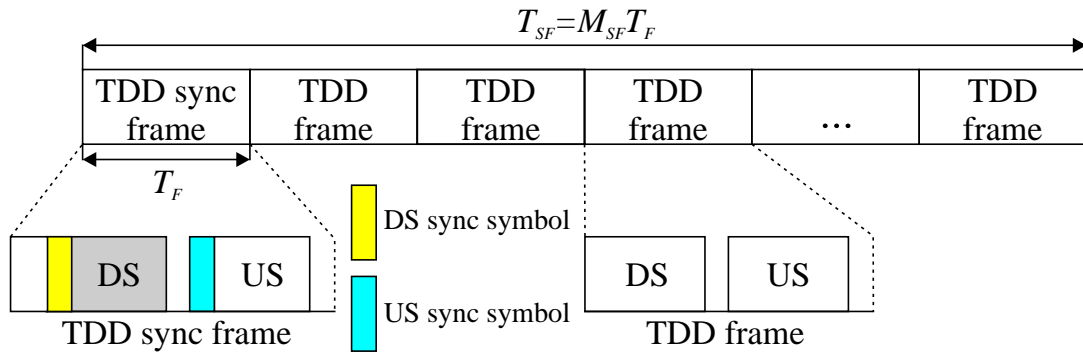
Rámce délek  $M_F = 36$  a  $M_F = 23$  musí být podporovány. Ostatní hodnoty jsou určeny pro další vývoj. Hodnota  $M_F$  a parametry rámce TDD  $M_{ds}$  a  $M_{us}$  jsou nastaveny během inicializace spojení (handshake), podle parametrů příslušného distribučního uzlu. Vždy ale musí platit  $M_{ds} + M_{us} \leq 35$ . Vysílací jednotka (FTU) musí podporovat rozsahy hodnoty  $M_{ds}$  podle tabulky Tab. 3.3. [12]

Tab. 3.3: Podporované hodnoty  $M_{ds}$  v závislosti na hodnotě  $M_F$  [12]

$M_F$	$M_{ds}$ podporované hodnoty
36	od 10 do 32
23	od 6 do 19

### 3.1.5 Struktura superrámce

Do struktury superrámce jsou za sebe vkládány TDD rámce tak, jak je uvedeno na obrázku (Obr. 3.2).



Obr. 3.2: Struktura superrámce [12]

Všechny TDD rámce obsažené v superrámci musí mít stejný formát tak, jak je uvedeno v předchozí kapitole, a jsou indexovány od 0 do  $M_{SF} - 1$ . Superrámce jsou přenášeny za sebou bez jakýchkoli mezer. Rámec s indexem 0 slouží k synchronizaci přenosu. Nese označení TDD sync frame a obsahuje synchronizační symboly pro sestupný (DS) i vzestupný (US) směr. Ten je následován obvyklými rámci. [12]

Parametr  $M_{SF}$  definuje počet TDD rámců obsažených v superrámci. Hodnota  $M_{SF}$  závisí na počtu symbolů v TDD rámcu a je popsána v tabulce:

Tab. 3.4: Povinné nastavení hodnoty  $M_{SF}$  v závislosti na  $M_F$  [12]

$M_F$	$M_{SF}$
36	8
23	12

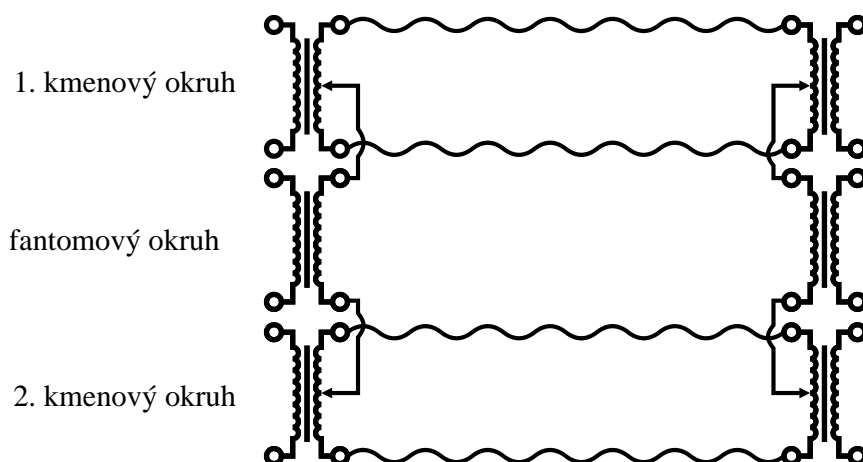
### 3.1.6 Modulace

Stejně, jako v předchozích případech je použita modulace DMT, je také možné využití plné vektorové modulace VDMT pro potlačení přeslechu FEXT. Může se stát, že z důvodu velké výpočetní náročnosti nebude možné vektorizaci používat. V takovém případě lze pro sdílený přístupový strom využít časového dělení přístupu TDMA. Odpadne tak starost s přeslechy FEXT, protože modem bude v jednom časovém úseku vysílat pouze na jednom vedení. [14]

U frekvenčního plánu 106a využívá modulace DMT 2048 subkanálů s roztečí 51,75 kHz (v případě VDSL2 je to 4,3125 případně 8,625 pro 30 MHz variantu). Počet alokovaných bitů je v tomto případě omezen na 12 (v předchozích systémech až 15) bitů. Díky použití adaptivní modulace nebude nutná při poklesu či nárůstu SNR (Signal-to-noise ratio) relokace nosných, ale uplatní se přechod na tzv. robustnější mód. V tomto módu se skupiny bodů v konstelačním diagramu sdružují do stavů modulace nižšího stupně. Když dojde v režimu modulace 16-QAM k nerozlišitelnosti stavů, začne se vyhodnocovat kvadrant, ve kterém se stavy vyskytují. Prakticky se tak přejde na čtyřstavovou modulaci 4-QAM. [15]

### 3.1.7 Využití fantomových okruhů

Fantomové okruhy se dříve využívaly ke zvýšení přenosové kapacity u dálkových telefonních vedení. Principem je vytvoření dalšího okruhu ze dvou vedení, navázáním signálu do středů transformátorů. Což je ukázáno na obrázku (Obr. 3.3). Omezení směrem k rostoucímu kmitočtu plyne z nemožnosti dokonalého vyvážení symetrizačních transformátorů. Dále je také nutné počítat s přeslechy mezi kmenovými a fantomovým okruhem. Přeslechy je ale i zde možné potlačit použitím modulace VDMT. [14]



Obr. 3.3: Princip fantomového okruhu [16]

Kromě fantomových okruhů lze pomocí čtyř vedení vytvořit tzv. superfantomový okruh. Je tedy možné získat až 7 okruhů, kromě 4 základních ještě 2 fantomové a mezi nimi jeden superfantomový okruh. [10]

### 3.1.8 Napájení uzlů

Nutné je také řešení napájení uzlů ležících mezi telefonní ústřednou a účastníkem. U přípojek G.fast se počítá s napájením od uživatele. Napájení distribučního bodu bude řešeno ze strany koncových zařízení. Není tak nutné řešit přívod napájení, a protože z druhé strany je distribuční bod připojen pouze optickým kabelem, není možné tuto trasu pro napájení použít. Podle počtu uživatelů, připojených k jednomu distribučnímu bodu, je ale nutné řešit sumarizaci napětí. [10]

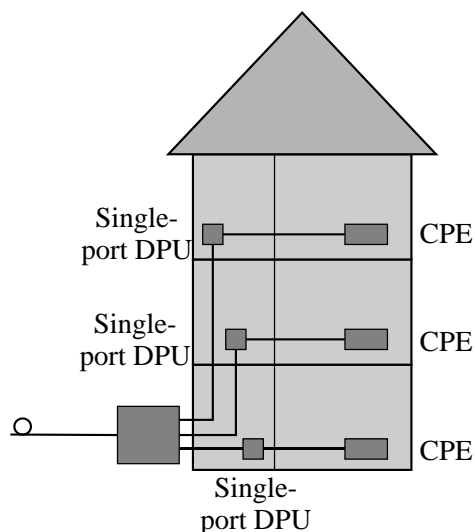
## 3.2 Řešení přístupových sítí

Se systémem G.fast se stejně jako v případě předchozích generací systému DSL počítá pro připojení na poslední míli. Vzhledem k využití vysokých kmitočtových pásem, a tedy i krátkých vzdáleností, na kterých je technologie využitelná, lze G.fast použít tam, kde je optické připojení velmi blízko uživateli. Standardně lze využít několik scénářů souhrnně označovaných jako FTTx (fiber to the), popisujících připojení na základě optických vláken.

### 3.2.1 FTTH

Scénář, který metalické kabely vůbec nevyužívá (případně u kterého je metalických kabelů využito až pro rozvod sítě u uživatele), se označuje jako FTTH (fiber to the home).

Optická komunikace je zde dovedena až do obytných, případně firemních prostor zákazníka. Toto připojení má všechny parametry náležící optickému připojení, avšak je nutné počítat s vysokými počátečními investicemi. Také zde není možná počáteční instalace připojení uživatelem. Fyzický zásah operátora je zde nevyhnutelný. [14]



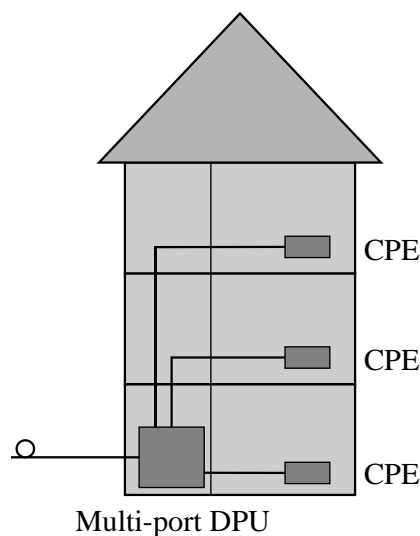
Obr. 3.4: FTTH [17]

Ve schématu topologie Obr. 3.4 vede optické vlákno samostatně k jednoportovým (Single-port) DPU v prostorách zákazníka. Dále je již rozvod lokální sítě řešen tradičními cestami, jako je metalický rozvod, případně bezdrátově.

### 3.2.2 FTTdp

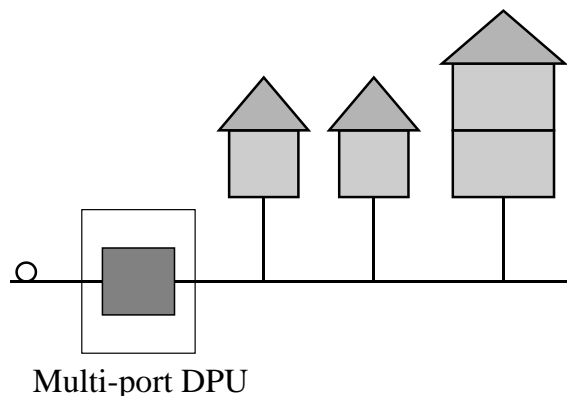
Další možností připojení, které již s metalickými kabely operuje na delší vzdálenost, souhrnně označujeme jako FTTdp (fiber to the distribution point) a dále je lze dělit na FTTB (fiber to the building) a FTTS (fiber to the street). Jak již názvy napovídají, jde o připojení optickým kabelem přímo do domu v případě FTTB a v případě FTTS je optický kabel přiveden do distribučního bodu umístěného na ulici.

Pro připojení do domu FTTB se využití G.fast jeví jako dobrá varianta. Na vysoké rychlosti připojení dosáhne velké množství uživatelů, a to za výrazně nižší náklady, než je tomu u připojení optikou ke každému uživateli. Ve většině případů bude vedení kratší než 100 metrů, tím je zajištěna vysoká přenosová rychlost. V topologii je využito víceportových (Multi-port) DPU, do kterých je přiveden optický kabel. Dále je již použito metalických kabelů tak, jak je vidět ve schématu Obr. 3.5.



Obr. 3.5: FTTB [17]

U připojení pomocí FTTS již může docházet k nezanedbatelnému narůstání vzdáleností nad 200 metrů a místo tu najdou i starší technologie ADSL a VDSL. Opět je zde použito víceportových (Multi-port) DPU v distribučním bodě. Optické připojení tak není přivedeno přímo do budov. Topologie je zobrazena na obrázku Obr. 3.6.



Obr. 3.6: FTTS [17]

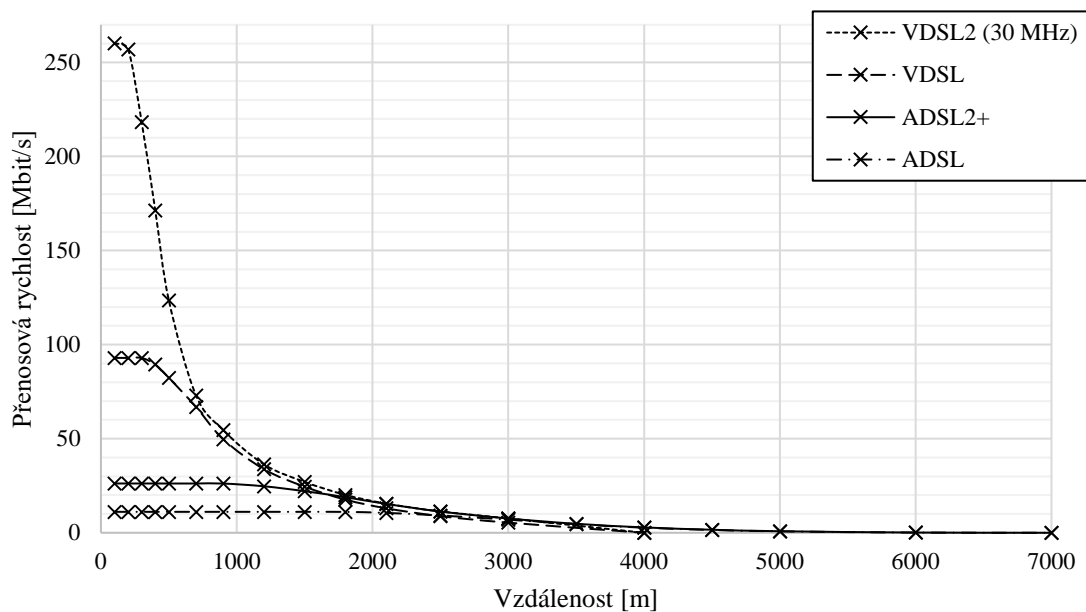
Kromě ekonomických hledisek je výhodné použít metalické vedení i z důvodů snadné instalace uživatelem. Není nutný žádný fyzický zásah technikem v místě připojení, uživatel je schopen nainstalovat přípojku sám. Je totiž nutné pouhé připojení k telefonnímu konektoru. Ve starších budovách nemusí být možné nebo je příliš složité instalovat optické vedení ke každému uživateli, to je další výhoda použití metalického vedení.

## 4 SIMULACE

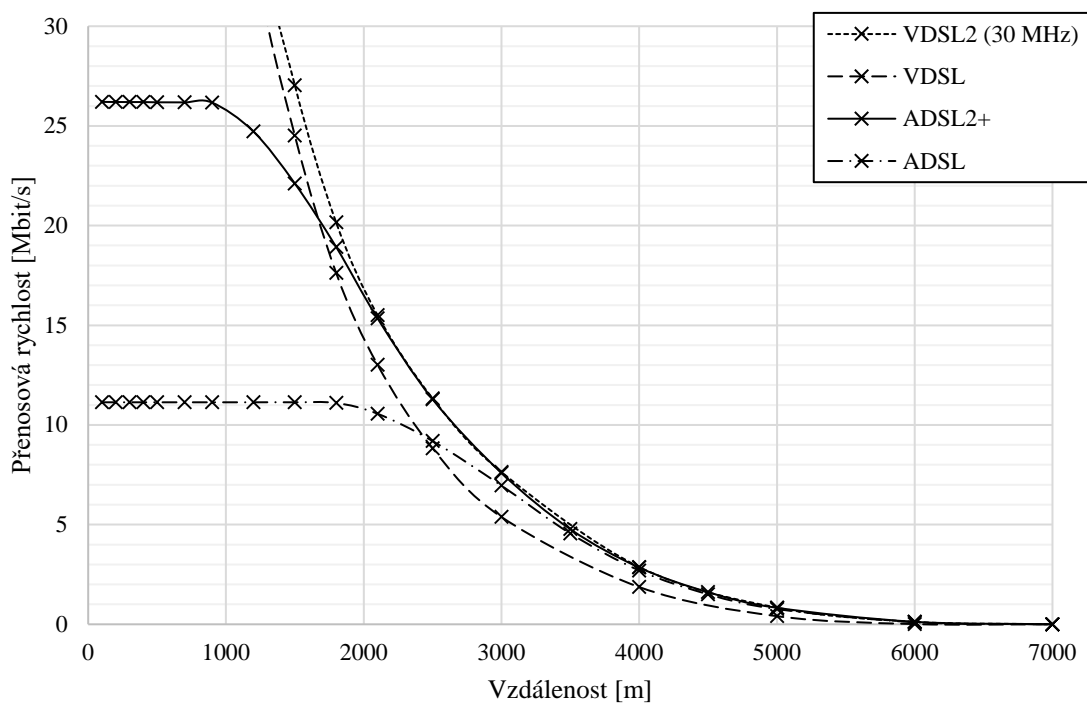
Pro potřeby simulace je využíván Simulátor přípojek xDSL [18], který využívá prostředí Matlab. Simulátor umožňuje simulaci různých typů technologií, provozovaných na různých typech a délkách vedení. Obsahuje modely rušení a stejně tak je možné si definovat rušení vlastní. Následující grafy jsou vytvořeny z hodnot tohoto simulačního programu. Jako vedení jsou využity typické evropské kabely specifikované dle ETSI v doporučení ITU-T G. 996.1 s průměrem jádra 4 mm. Šumová rezerva je nastavena na 6 dB a hodnota šumu přípojky AWGN = -140 dBm/Hz. Simulace byly prováděny pro ideální podmínky jediné přípojky v kabelu.

### 4.1 Srovnání technologií

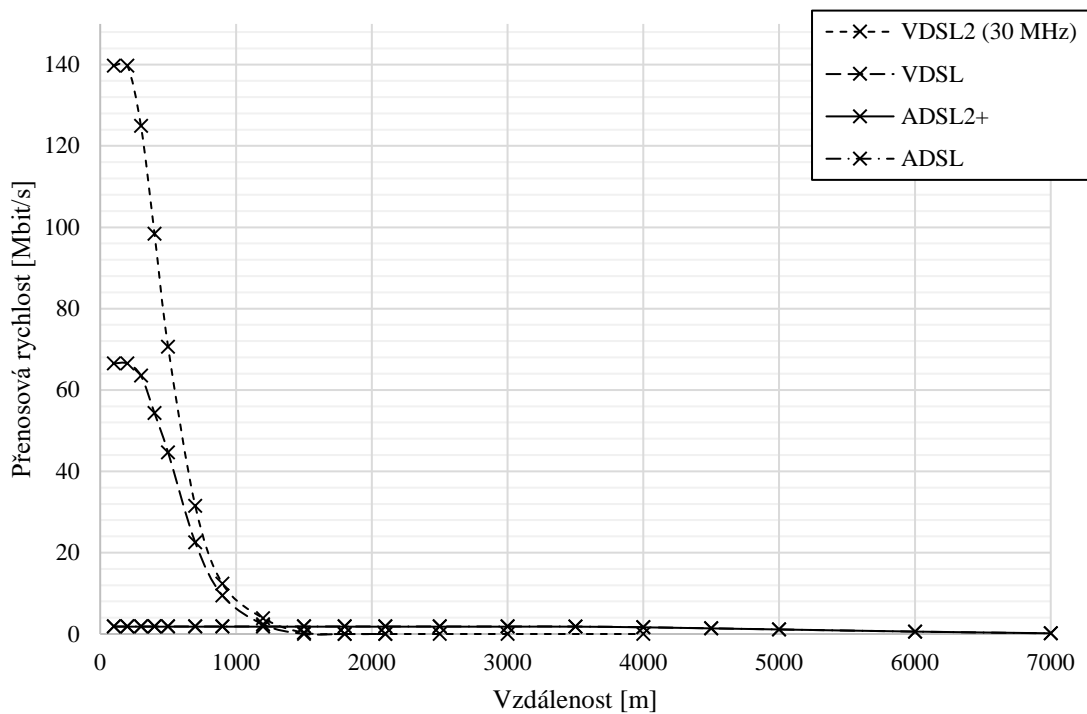
V prvním grafu je uvedeno srovnání přenosových rychlostí pro sestupný (Graf 4.1) a vzestupný (Graf 4.3) směr na různých délkách vedení pro asymetrické varianty technologie VDSL, ADSL, ADSL2+ a VDSL2.



Graf 4.1: Závislost rychlosti v sestupném směru na délce vedení pro ADSL/2+, VDSL, VDSL2 [18]

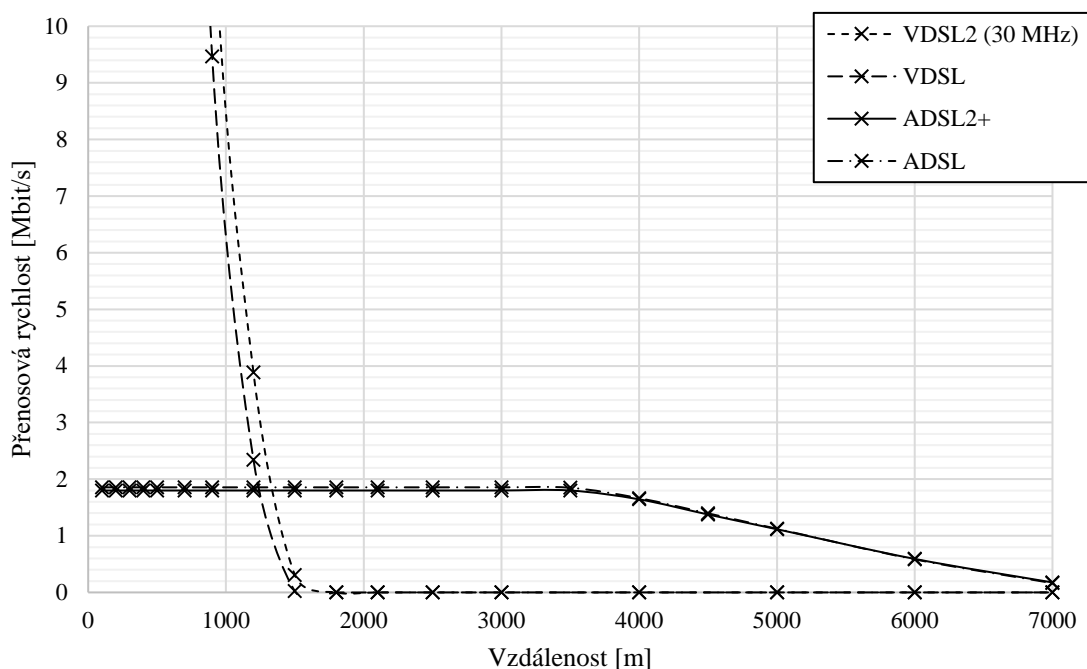


Graf 4.2: Závislost rychlosti v sestupném směru na délce vedení (výřez) [18]



Graf 4.3: Závislost rychlosti ve vzestupném směru na délce vedení pro ADSL/2+, VDSL, VDSL2 [18]



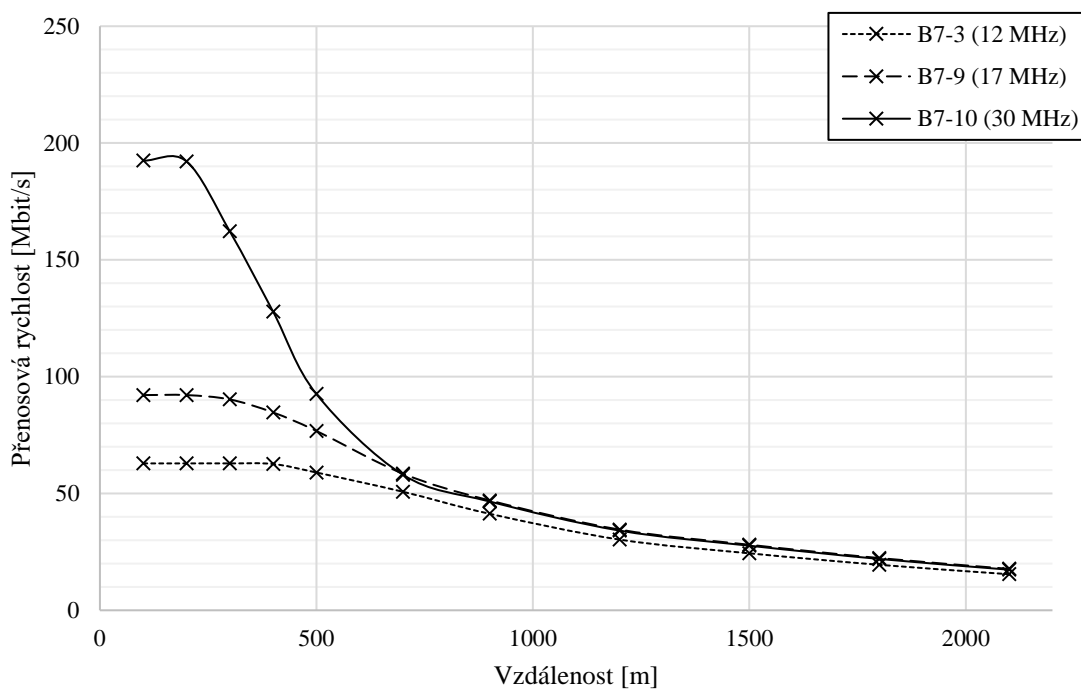


Graf 4.4: Závislost rychlosti ve vzestupném směru na délce vedení (výřez) [18]

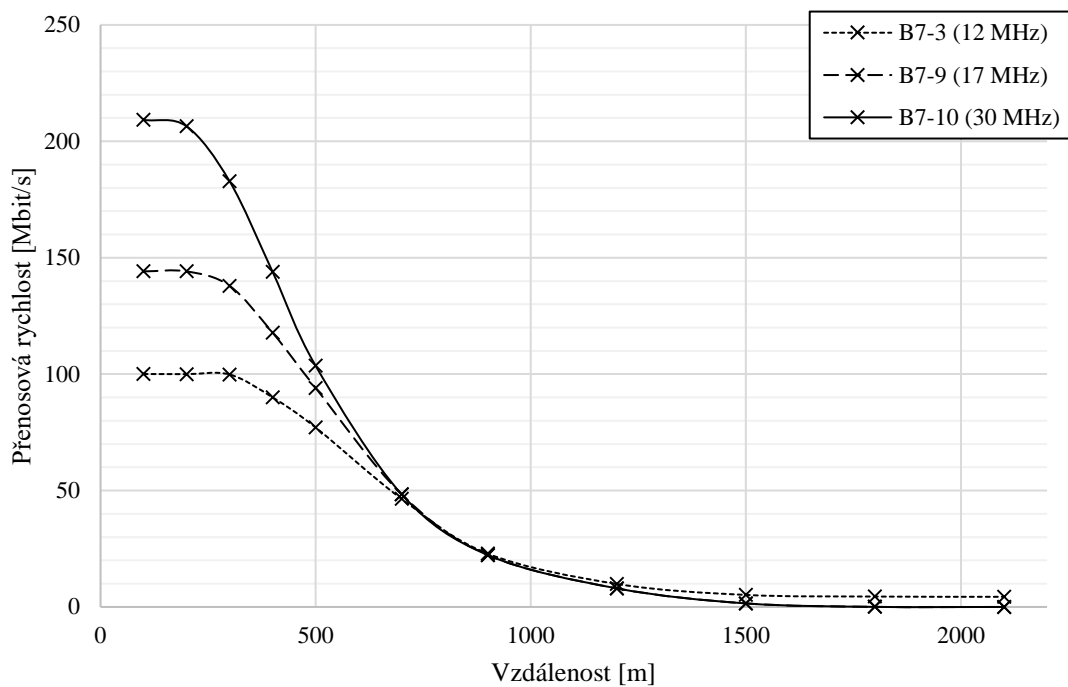
Simulace ukazuje, že je technologie VDSL2 s využitím šířky pásma 30 MHz použitelná do vzdálenosti 1500 m. Poté je již využitelný pouze sestupný směr, vzestupný je nulový. Maxim lze dosáhnout do vzdáleností 400 m, poté přenosové rychlosti prudce klesají. Totéž platí i pro technologii VDSL. Oproti tomu technologie ADSL a ADSL2+ nedosahují tak vysokých přenosových rychlostí, ovšem se vzdáleností klesají rychlosti mnohem pomaleji, a to hlavně pro směr upstream, který si až do vzdálenosti 3,5 km zachovává konstantní hodnotu. Poté začne lineárně klesat. To je dobře vidět ve výřezech Graf 4.2 a Graf 4.4. Díky tomu je tyto technologie možné v ideálních podmínkách využívat až na vzdálenost 6 km. Jasně se zde ukazuje, proč jsou přípojky ADSL2+ stále využívány a proč i nadále využívány budou.

## 4.2 VDSL2

Annex B využívaný v Evropě se dělí na dva základní kmitočtové plány - 997 pro symetrické varianty a plán 998 pro asymetrické. V následujícím grafu jsou srovnány přenosové rychlosti v sestupném (Graf 4.5) a vzestupném (Graf 4.6) směru pro kmitočtový plán 997 a konkrétní masky spektrální výkonové hustoty podle doporučení ITU-T G.993.2. Pro oba plány jsou simulovány masky s využitou šířkou pásma 12, 17 a 30 MHz.

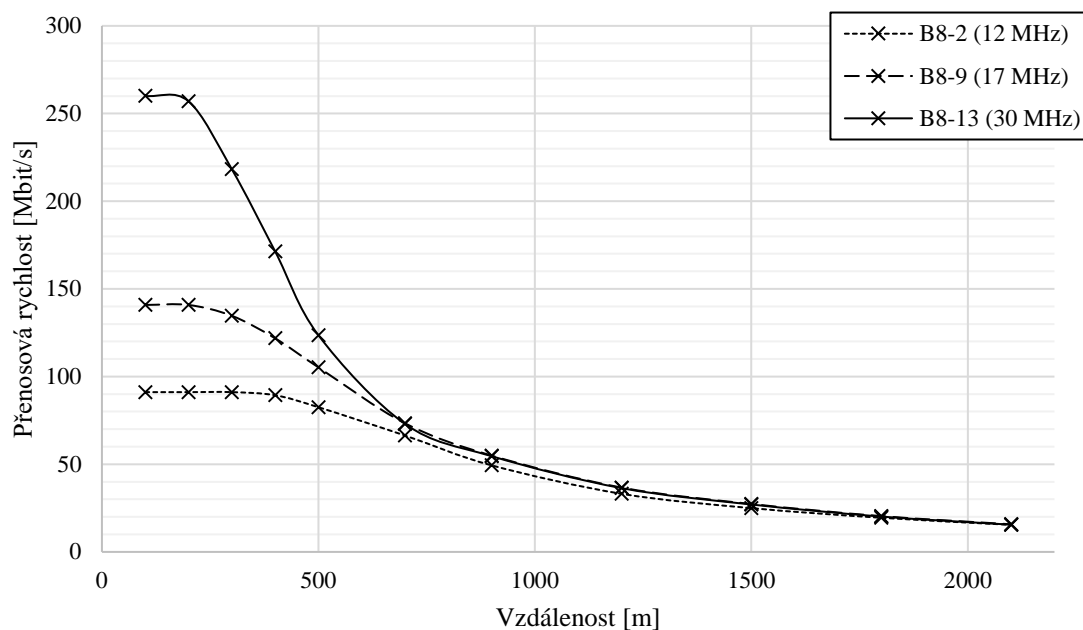


Graf 4.5: Závislost přenosové rychlosti v sestupném směru pro různé typy masek PSD plánu 997 [18]

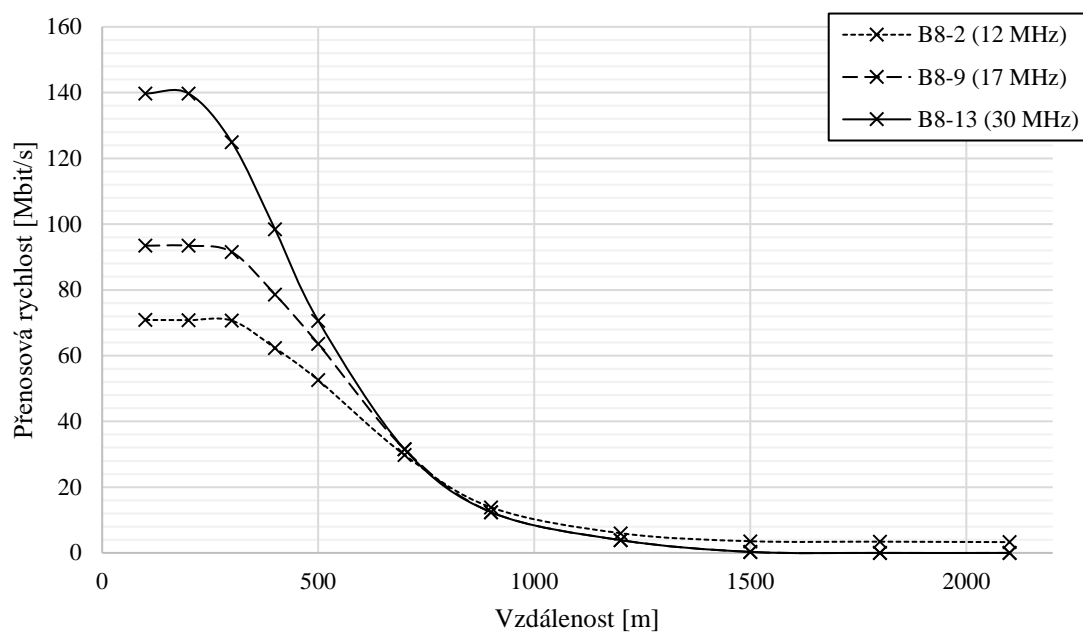


Graf 4.6: Závislost přenosové rychlosti ve vstředním směru pro různé typy masek PSD plánu 997 [18]

Následující grafy jsou výsledkem simulace pro plán 998. Sestupný směr (Graf 4.7) vze-  
stupný směr (Graf 4.8).



Graf 4.7: Závislost přenosové rychlosti v sestupném směru pro různé typy masek PSD plánu 998 [18]

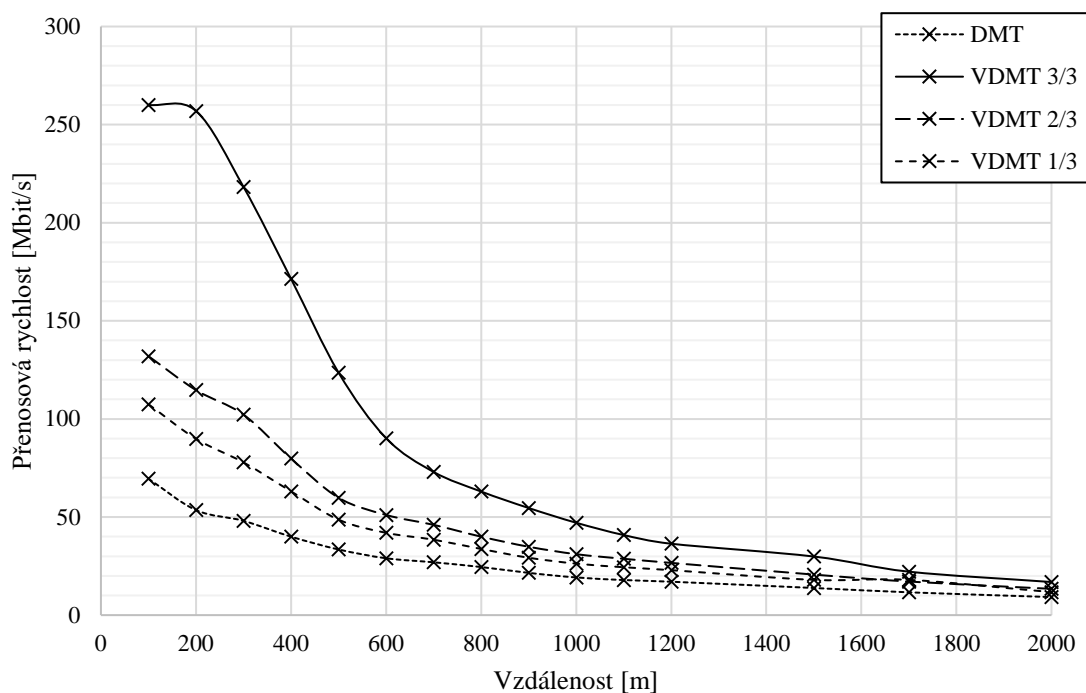


Graf 4.8: Závislost přenosové rychlosti ve vzešupném směru pro různé typy masek PSD plánu 998 [18]

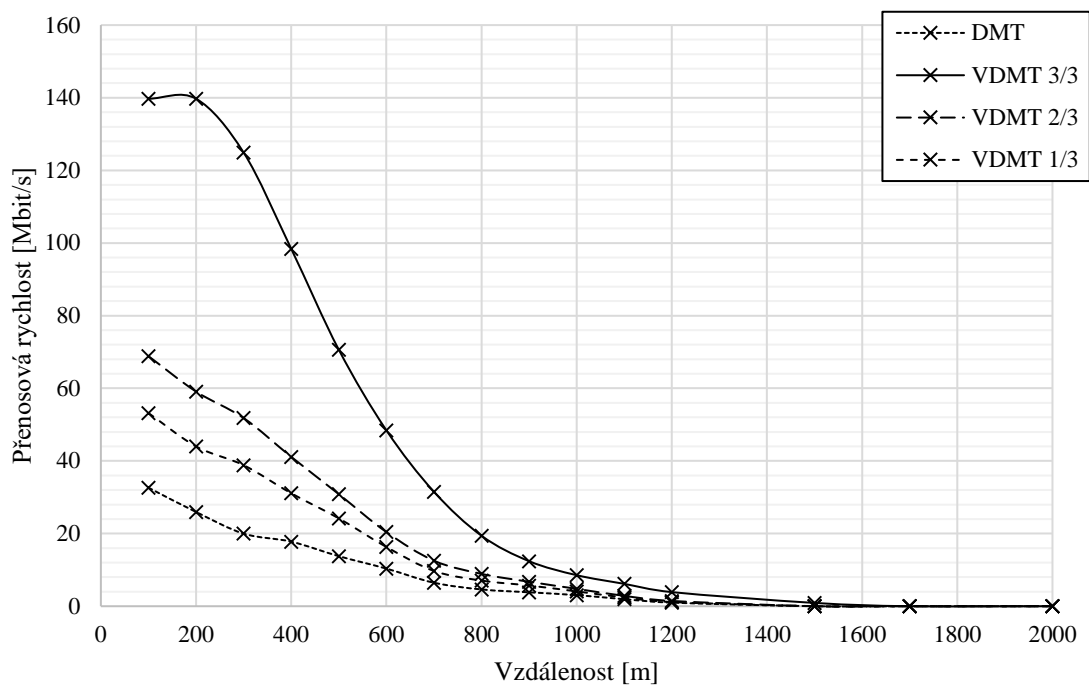
Využití vyšších kmitočtových plánů má teoreticky smysl do 700 m. Poté je již přenosová rychlost prakticky totožná pro všechny varianty, a to jak pro vzestupný směr, tak i sestupný směr přenosu. Využitelnost technologie VDSL2 se blíží vzdálenosti 1500 m. V grafech se také ukazuje rozdíl mezi symetrickým a asymetrickým plánem. Nicméně výhody symetrické varianty se projevují opět jen na krátké vzdálenosti. Od 400 m je využitelná spíše asymetrická varianta

### 4.3 Vektorová modulace VDMT

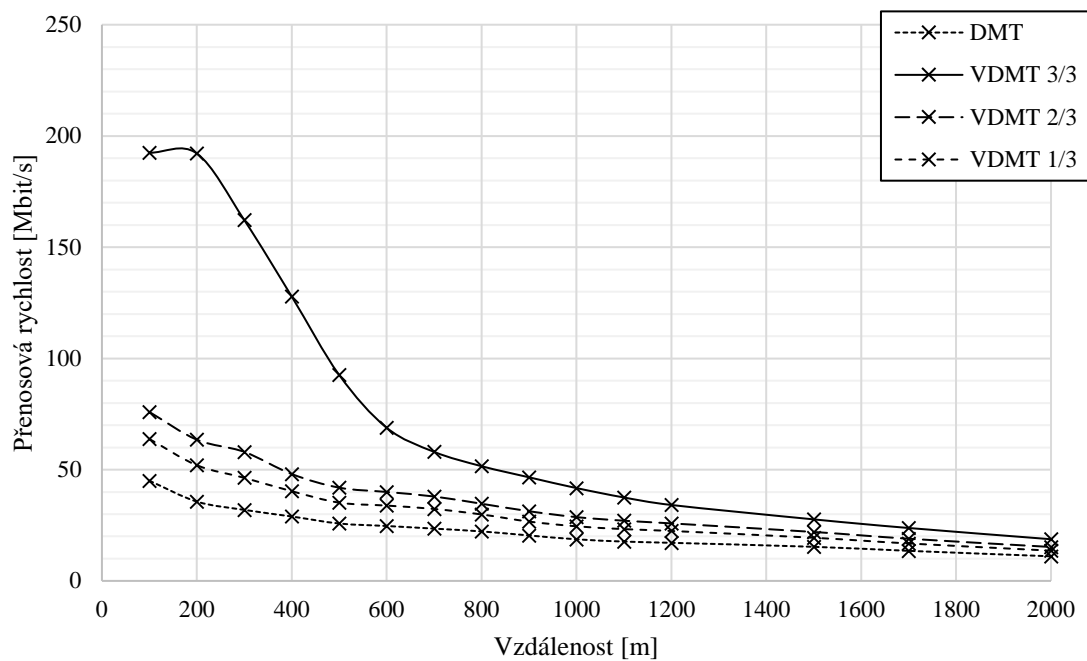
Pro simulaci vlivu VDMT je použit Analyzátor VDMT, který využívá prostředí Matlab a vychází ze Simulátor přípojek xDSL. Program je doplněn o možnost koordinování přípojek v kabelu. Stejně jako v předchozích simulacích je systém umístěn na kabelu o průměru jádra 0,4 mm a standardu ESTI. Šumová rezerva je nastavena na 6 dB a hodnota šumu přípojky AWGN = -140 dBm/Hz. Simulace byly prováděny pro 30 navzájem se ovlivňujících přípojek stejného, a kmitočtové plány 997 a 998 s maximálním využitím kmitočtového pásma 30 MHz. Pro plán 997 je uvažována přípojka B7-10, pro plán 998 přípojka B8-13. Ve všech následujících grafech jsou vykresleny případy s využitím plné, částečné či vůbec žádné koordinace přípojek v kabelu.



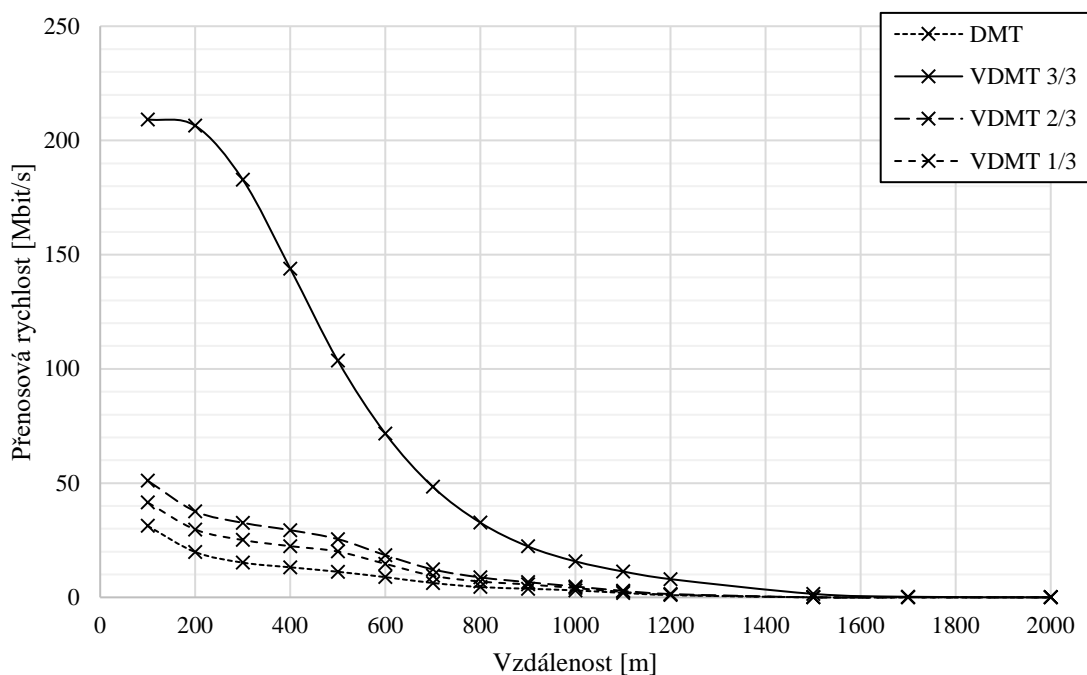
Graf 4.9: Vliv koordinace na rychlost v sestupném směru pro plán 998 B8-13 [19]



Graf 4.10: Vliv koordinace na rychlost ve vzestupném směru pro plán 998 B8-13 [19]



Graf 4.11: Vliv koordinace na rychlost v sestupném směru pro plán 997 B7-10 [19]



Graf 4.12: Vliv koordinace na rychlost ve vzestupném směru pro plán 997 B7-10 [19]

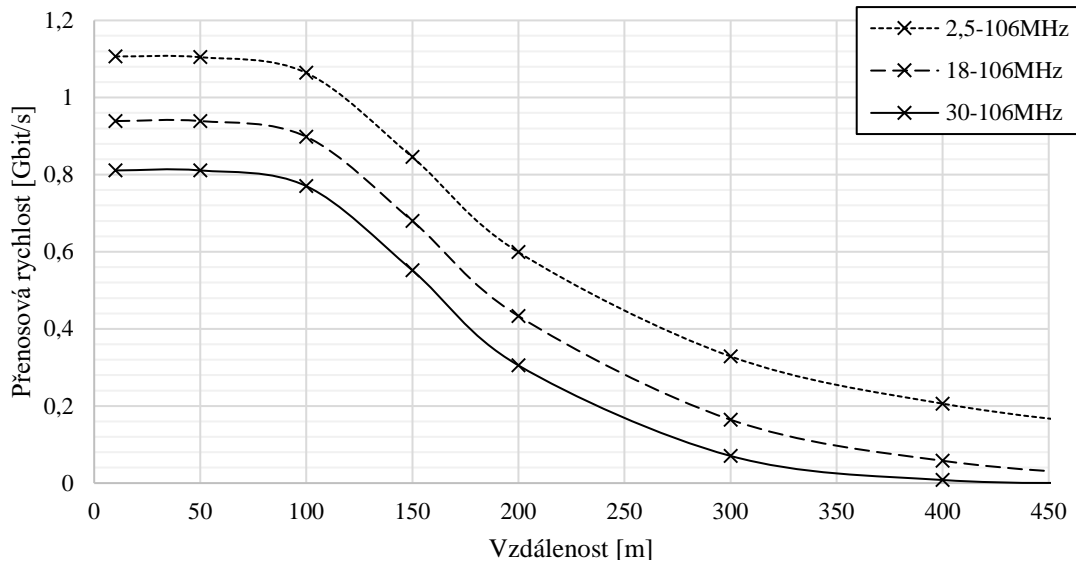
Přínos vlivu kordinace přípojek na přenosové rychlosti v obou směrech je jasně patrný, a to jak pro plán 997, tak 998. V případě plné koordinace dosahují přenosové rychlosti rychlostí pro jedinou přípojku v kabelu, což při těchto podmínkách přenosu s 30 navzájem se ovlivňujícími páry stejného typu přípojky představuje až čtyřnásobný nárůst přenosové rychlosti. Tato rychlost bude ale v praxi nedosažitelná, vždy bude docházet k rušení nekoordinovanými přípojkami. Stejně tak může docházet k chybám při výpočtech koordinovaných DMT symbolů.

Kromě vlivu na přenosovou rychlost je důležitý i vliv na využitelnou vzdálenost přenosu. Koordinací přípojek lze dosáhnout zvýšení přenosové vzdálenosti až o 300 m pro asymetrický plán 998. Pro symetrický plán 997 až o 500 m v ideálních podmínkách simulace. Podstatný je vliv vectoringu na vzestupný směr, jehož přenosové rychlosti klesají rychleji, než je tomu u směru sestupného.

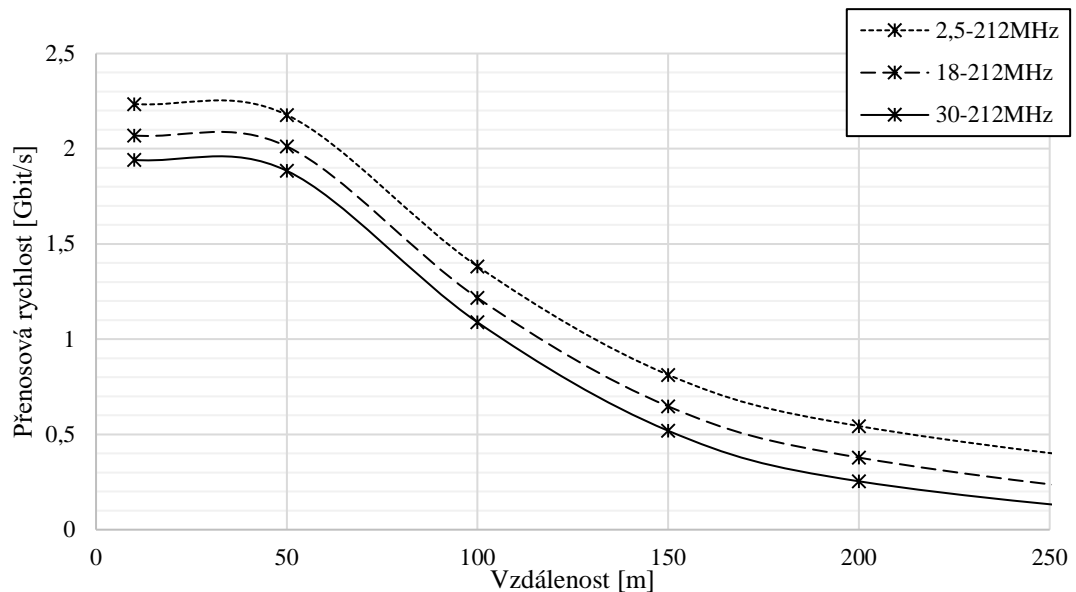
Vectoring na metalickém vedení je i přes velké nároky na výpočetní výkon velkým přínosem. Lze pozorovat zlepšení jak v případě přenosových rychlostí, tak i přenosových vzdáleností, na kterých lze systémy používající vektorovou DMT modulaci provozovat. V případě VDSL2 lze na krátkých vedeních s podporou vectoringu dosahovat velmi vysokých přenosových rychlostí.

## 4.4 G.fast

Pro následující simulace je využito simulátoru přípojek G.fast, který pracuje v prostředí Matlab. Následující grafy zobrazují celkové přenosové rychlosti pro kmitočtové plány 106a (Graf 4.13) a 212a (Graf 4.14). Každý plán je simulován s různými počátečními frekvencemi. Ty jsou nastaveny na 2,5 MHz 18 MHz a 30 MHz, tedy tak, aby bylo možné systém použít v koexistenci se předchozími technologiemi.



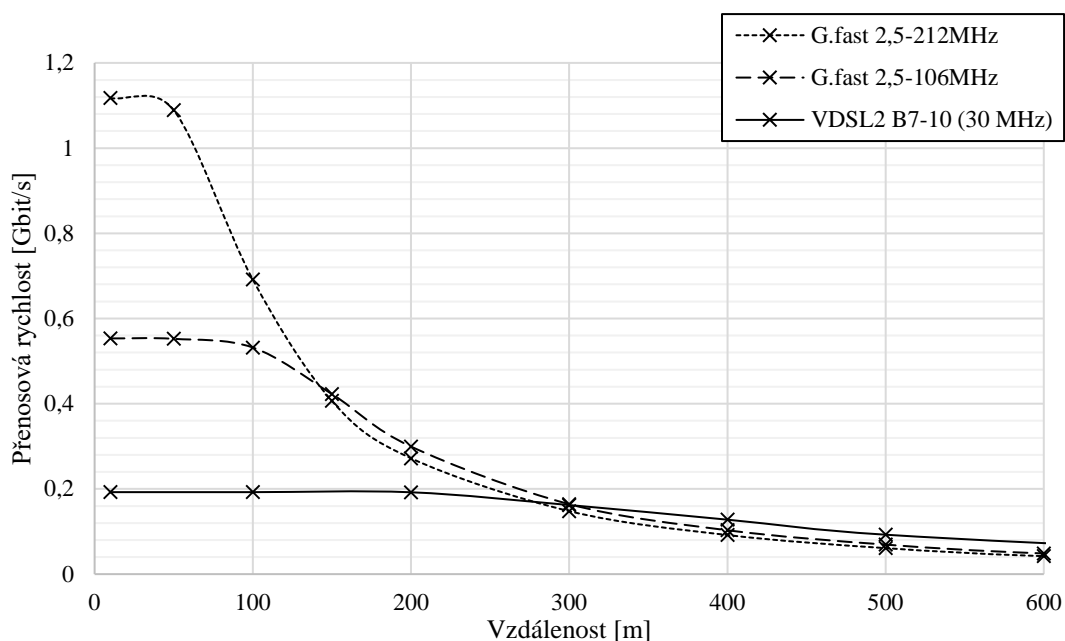
Graf 4.13: Závislost celkové přenosové rychlosti na délce vedení pro různé počátky plánu 106a [20]



Graf 4.14: Závislost celkové přenosové rychlosti na délce vedení pro různé počátky plánu 212a [20]

Rychlosti plánu 106a se do vzdálenosti 100 metrů pohybují okolo 1 Gbit/s. To je tedy přesně tak, jak požaduje doporučení. Pro plán 212a dosahují rychlosti až 2 Gbit/s, to ale pouze na přípojkách do 50 metrů. Pro oba plány je možné pozorovat velké rychlostní propady vzhledem k délce vedení zapříčiněné využitím vysokých kmitočtů. Dá se říct, že s dvojnásobnou vzdáleností klesá přenosová rychlost na polovinu. Například u plánu 106a který na stometrových přípojkách dosahuje zmiňovaného 1 Gbit/s, dosáhneme na dvousetmetrové přípojce maximální rychlosti asi 0,5 Gbit/s. To stejné platí i pro plán 212a.

Kvůli odlišné duplexní metodě u G.fast TDD a u ostatních technologií FDD, není srovnání dokonale vypovídající. Pro srovnání jsou zvoleny symetrické varianty přípojek VDSL2 a G.fast. Následující graf ukazuje přenosové rychlosti v sestupném směru. Dosažitelné rychlosti ve vzestupném směru jsou v symetrické variantě prakticky stejné.

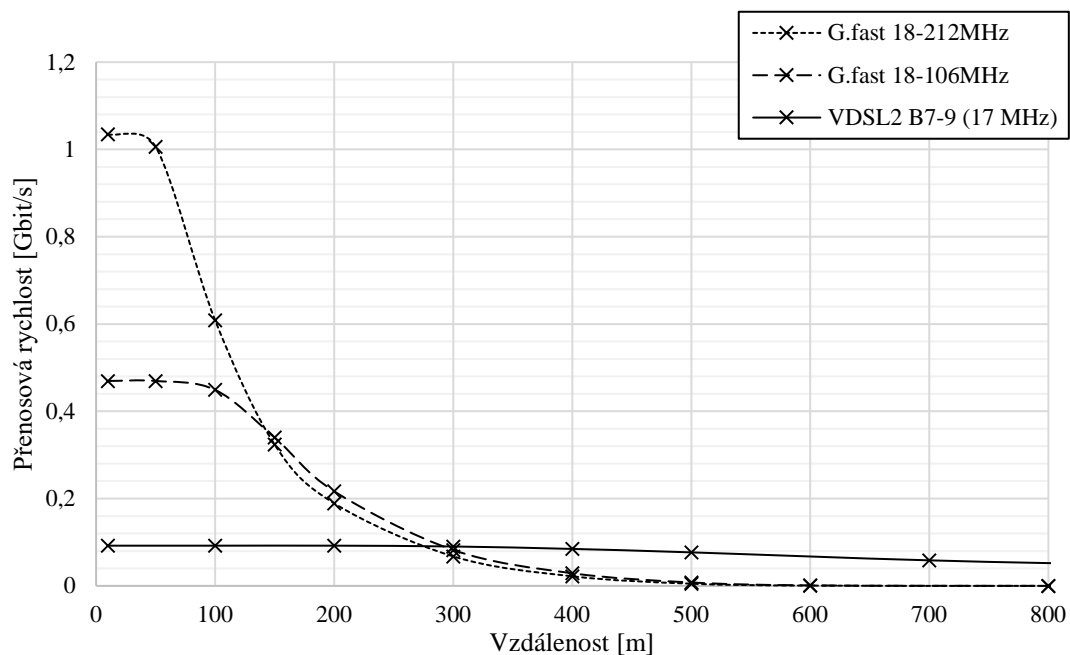


Graf 4.15: Srovnání G.fast a VDSL2 [20], [18]

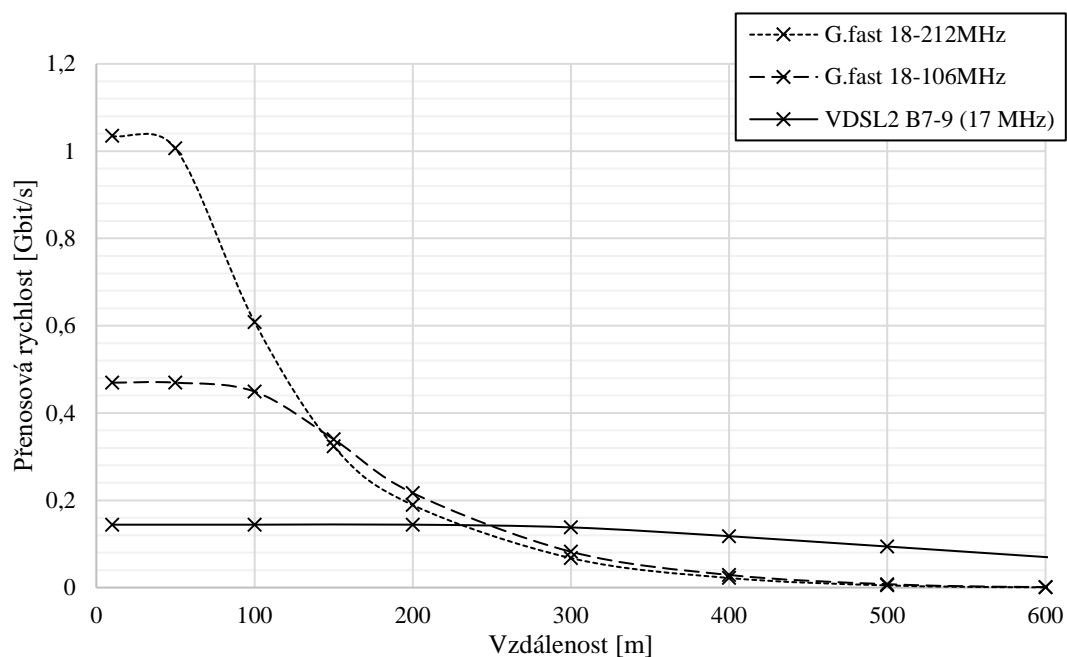
Rychlosti se vyrovnávají na hranici 300 metrů. Od této vzdálenosti již nemá smysl G.fast nasazovat.

V praxi využitelnou se jeví G.fast v pásmu 18-106 MHz (případně 212 MHz) v kombinaci s VDSL2 v pásmu do 17 MHz. Pásma se v tomto případě nepřekrývají a koexistence je tak zaručena, což ukazuje následující graf. Opět je zde použito symetrických variant a je zobrazen sestupný (Graf 4.16) i vzestupný (Graf 4.17) směr přenosu.





Graf 4.16: Srovnání G.fast (18-106,212MHz) a VDSL2 (17MHz) pro sestupný směr [18], [20]



Graf 4.17: Srovnání G.fast (18-106,212MHz) a VDSL2 (17MHz) pro vzestupný směr [18], [20]

Do vzdálenosti 200 metrů je výhodné použít technologii G.fast, na delší vzdálenosti potom VDSL2. Přínos G.fast je tak na krátkých přípojkách velký a značně rozšiřuje možnosti VDSL2.

## 5 ZÁVĚR

V práci jsou rozebrány základní parametry technologií rodiny DSL, jsou uvedeny jejich teoretické přenosové rychlosti, maximální přenosové vzdálenosti a použité modulační schémata. Úvodní kapitola se také věnuje základním parametrům vedení, zejména útlumu, přeslechům v kabelech a vnějším zdrojům rušení.

V kapitole zaměřené na technologii VDSL2 jsou rozebrány různé typy přípojek, určených pro různá prostředí, tabulka profilů a kmitočtové plány v Evropě používaného Annexu B. Je zde také uveden referenční model protokolů na uživatelské úrovni. Kapitola se zabývá srovnáním technologie VDSL2 se staršími a stále využívanými technologiemi.

Závěr kapitoly je věnován technologii vectoring, která je určena k potlačení přeslechů na vedení. Jsou zde uvedeny základní vlastnosti modulace DMT a vektorové modulační schéma VDMT. Vliv koordinace je zde znázorněn trojrozměrnými grafy vlivu počtu koordinovaných přípojek na přenosovou rychlost a vzdálenost.

V kapitole o technologii G.fast jsou popsány profily a s nimi související masky PSD, část je věnována duplexní metodě, která je odlišná od metody používané u xDSL systémů. S duplexní metodou úzce souvisí i struktura rámců, která je v kapitole také popsána.

Poslední kapitola je věnována simulacím vlastností, popsaných v předchozích kapitolách, a interpretacím výsledků.

V první části jsou uvedeny výsledky simulace pro srovnání přenosových rychlostí technologií ADSL, ADSL2+, VDSL a VDSL2. Ve druhé části je simulace zaměřena na technologii VDSL2, její rychlosti a využitelné vzdálenosti pro varianty s různými šířkami pásma a pro symetrický a asymetrický plán přenosu. Další část se zabývá využitím vectoringu. Jsou vykresleny grafy použití plné či částečné vektorizace přípojek, jejich vliv na užitečnou vzdálenost a přenosové rychlosti.

V poslední části jsou simulovány oba plány technologie G.fast. Je zde také uvedeno srovnání s technologií VDSL2. Pro srovnání byly vybrány symetrické varianty přenosu, nicméně kvůli použití odlišné duplexní metody je nutné brát toto srovnání pouze orientačně.

# BIBLIOGRAFIE

- [1] ŠIMÁK, Boris, Jiří VODRÁŽKA a Jaroslav SVOBODA. *Digitální účastnické přípojky xDSL: Díl 1. - Metody přenosu, popisy přípojek HDSL, SHDSL, ADSL, VDSL*. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 2005, 141 s. Telekomunikace (Sdělovací technika). ISBN 808664507X.
- [2] ITU-T G.992.1: *Asymmetric digital subscriber line (ADSL) transceivers* [online]. 1999 [cit. 2016-11-04]. Dostupné z: [https://www.itu.int/rec/dologin\\_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.992.3-200904-I!!ZPF-E&type=items](https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.992.3-200904-I!!ZPF-E&type=items)
- [3] BINGHAM, John. *ADSL, VDSL, and multicarrier modulation*. 1. vyd. New York: Wiley, 2000, 289 s. ISBN 0471290998.
- [4] ITU-T G.992.5: *Asymmetric digital subscriber line 2 transceivers (ADSL2) - Extended bandwidth ADSL2 (ADSL2plus)* [online]. 2009 [cit. 2016-11-29]. Dostupné z: [https://www.itu.int/rec/dologin\\_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.992.5-200305-S!!PDF-E&type=items](https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.992.5-200305-S!!PDF-E&type=items)
- [5] ITU-T G.993.2: *Very high speed digital subscriber line transceivers 2 (VDSL2)* [online]. 2011 [cit. 2016-10-21]. Dostupné z: [https://www.itu.int/rec/dologin\\_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.993.2-201501-I!!PDF-E&type=items](https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.993.2-201501-I!!PDF-E&type=items)
- [6] VODRÁŽKA, Jiří a Boris ŠIMÁK. *Digitální účastnické přípojky xDSL: Díl 2. - Přenosové prostředí, druhá generace ADSL a VDSL, měření na přípojkách*. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 2008, 156 s. Telekomunikace (Sdělovací technika). ISBN 8086645169.
- [7] VODRÁŽKA, Jiří. Druhá generace VDSL2. In: *Access server CVUT* [online]. 2005 [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2005093001>
- [8] JAREŠ, Petr. *Digitální účastnická přípojka VDSL2* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická, b.r. [cit. 2016-10-18]. Dostupné z: [http://data.cedupoint.cz/oppa\\_e-learning/2\\_KME/076.pdf](http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/076.pdf)
- [9] JAREŠ, Petr. Vektorová modulace DMT. In: *Access server CVUT* [online]. 2007 [cit. 2016-11-23]. Dostupné z:

<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2007010002>

- [10] PRAVDA, Ivan. *Nové trendy v elektronických komunikacích: Moderní modulační metody a jejich aplikace* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, b.r. [cit. 2016-11-04]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/234/02.html>
- [11] CETIN nabídne 250 Mbit, vysunuté DSLAM napájí dálkově. In: *Root.cz* [online]. 2016 [cit. 2017-02-05]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/cetin-nabidne-250-mbit-vysunute-dslam-napaji-dalkove/?ic=gallery-slide&icc=backlink>
- [12] ITU-T G.9701: *Fast access to subscriber terminals (G.fast) - Physical layer specification* [online]. 2004 [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/recommendation.asp?lang=en&parent=T-REC-G.9701-201412-I>
- [13] ITU-T G.9700: *Fast access to subscriber terminals (G.fast) - Power spectral density specification* [online]. 2014 [cit. 2017-02-07]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9700/recommendation.asp?lang=en&parent=T-REC-G.9700-201404-I>
- [14] KRISHNA, Ram, Sidh KUMAR, D. MENSE a Avadhesh SINGH. *Study Paper On G.fast* [online]. 2016 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: [http://tec.gov.in/pdf/Studypaper/study%20paper%20on%20G.fast\\_13.10.2016.pdf](http://tec.gov.in/pdf/Studypaper/study%20paper%20on%20G.fast_13.10.2016.pdf)
- [15] VODRÁŽKA, Jiří. Další stádium vývoje digitálních účastnických přípojek. In: *Access server CVUT* [online]. České vysoké učení technické v Praze, FEL, 2013 [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: <http://access.fel.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2013030001>
- [16] PRAVDA, Ivan. *Nové trendy v elektronických komunikacích Vysokorychlostní přípojky VDSL a G.fast* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, b.r. [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/233/04.html>
- [17] TIMMERS, Michael, Mamoun GUENACH, Carl NUZMAN a Jochen MAES. G.fast: evolving the copper access network. *IEEE Communications Magazine* [online]. 2013, **51**(8), 74-79 [cit. 2017-05-17]. DOI: 10.1109/MCOM.2013.6576342. ISSN 0163-6804. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6576342/>
- [18] JAREŠ, Petr a Jiří VODRÁŽKA. *Simulátor přípojek xDSL [v1.0]: simulátor* [online]. 2008: České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická, b.r.

- [cit. 2016-11-24]. Dostupné z: <http://matlab.feld.cvut.cz/download.php?sekce=1>
- [19] JAREŠ, Petr a Jiří VODRÁŽKA. *Analyzátor VDMT [v1.0]: simulátor* [online]. České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická, 2008 [cit. 2016-11-29]. Dostupné z: <http://matlab.feld.cvut.cz/download.php?sekce=10>
- [20] JAREŠ, Petr a Jiří VODRÁŽKA. *Simulátor přípojky G.fast [v1.0]: simulátor* [online]. České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická, 2014 [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: <http://matlab.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2014120001>

# SEZNAM ZKRATEK

ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line	Asymetrická digitální účastnická linka
AWGN	Additive white Gaussian noise	Aditivní bílý šum s gaussovským rozložením
CAP	Carrierless Amplitude Phase modulation	Amplitudově fázová modulace bez nosné
DMT	Discrete MultiTone	Diskrétní multitónová modulace
DS	DownStream	Sestupný směr
DSL	Digital Subscriber Line	Digitální účastnická linka
DSLAM	DSL Access Multiplexer	Přístupový multiplexer DSL
DTU	Data Transfer Unit	Jednotka přenosu dat
EC	Echo Cancelation	Potlačení ozvěn
FDD	Frequency Division Duplex	Frekvenční dělení
FEC	Forward Error Correction	Korekce dopředné chyby
FEXT	Far-End crosstalk	Přeslech na vzdáleném konci
FTTB	Fibre To The Building	Vlákno do budovy
FTTdp	Fibre To The distribution point	Vlákno do distribučního místa
FTTH	Fibre To The Home	Vlákno do obytných prostor
FTTS	Fibre To The Street	Vlákno na ulici
FTU	Fast Transceiver Unit	Rychlá vysílací jednotka
FTU-O	FTU at the Optical network unit	Rychlá vysílací jednotka optické sítě
FTU-R	FTU at the Remote site	Rychlá vysílací jednotka koncové sítě
ISDN	Integrated Services Digital Network	Digitální síť integrovaných služeb
NEXT	Near End Crosstalk	Přeslech na blízkém konci
POST	Plain Old Telephone Service	Analogová telefonní služba
PSD	Power Spectral Density	Spektrální výkonová hustota
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	Kvadrurní amplitudová modulace

STDD	Synchronous Time-Division Duplexing	Synchronizované časové dělení
TDD	Time-Division Duplexing	Časové dělení
TDMA	Time Division Multiple Access	Časově oddělený mnohonásobný přístup
US	UpStream	Vzestupný směr
VDMT	Vectored Discrete Multitone	Vektorová diskrétní multitónová modulace
VDSL	Very high speed DSL	Vysokorychlostní digitální účastnická linka